



TITLE:

国際通信衛星搭載用複反射鏡形式 マルチビームアンテナの設計に関 する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

牧野, 滋

CITATION:

牧野, 滋. 国際通信衛星搭載用複反射鏡形式マルチビームアンテナの設計に関する研究. 京都大学, 1994, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1994-05-23

URL:

<https://doi.org/10.11501/3096582>

RIGHT:

27

国際通信衛星搭載用複反射鏡形式
マルチビームアンテナの設計に関する研究

牧野 滋



目次

1	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	従来の研究の概要	3
1.2.1	鏡面系の研究	3
1.2.2	給電アレーの研究	7
1.3	本研究の概要	9
1.3.1	鏡面系の研究	9
1.3.2	給電アレーの研究	10
2	オフセットカセグレン、グレゴリアン形式マルチビームアンテナの性能限界	12
2.1	序言	12
2.2	鏡面系の座標系と設計パラメータ	13
2.3	等価オフセットパラボラによる検討	16
2.4	焦点から離れた位置にある光源より出た光線のレイトレース	18
2.5	放射特性の計算法	20
2.6	所望のビーム偏向方向に対応する一次放射器の位置	23
2.7	オフセットカセグレン形式マルチビームアンテナの検討	25
2.7.1	設計パラメータの選定	25
2.7.2	鏡面構成例とそのビーム偏向特性	27
2.8	オフセットグレゴリアン形式マルチビームアンテナの検討	30
2.8.1	設計パラメータの選定	30
2.8.2	鏡面構成例とそのビーム偏向特性	31

2.9	結言	46
3	修整副反射鏡をもつオフセットグレゴリアン形式マルチビームアンテナ	47
3.1	序論	47
3.2	鏡面設計法	48
3.2.1	設計手順	48
3.2.2	座標系と鏡面座標の初期値	49
3.2.3	収束のない理想副反射鏡	51
3.2.4	修整関数のパラメータと最適値の決定法	53
3.3	設計例	56
3.3.1	一次元的なビーム配列をもつマルチビームアンテナ	56
3.3.2	二次元的なビーム配列をもつマルチビームアンテナ	59
3.4	修整関数の項数と修整のくり返し回数	63
3.5	結言	65
4	フロントフィードオフセットカセグレン形式マルチビームアンテナ	66
4.1	序言	66
4.2	鏡面系の設計パラメータと座標系	67
4.3	マルチビームアンテナとしての設計パラメータの選定	67
4.4	鏡面構成例とそのビーム偏向特性	68
4.5	衛星搭載用 <i>F</i> <i>FOC</i> 形式マルチビームアンテナの設計例	85
4.6	試作アンテナの放射特性	92
4.7	結言	96
5	フロントフィードオフセットカセグレン形式のアレー給電マルチ成形ビームアンテナ	97
5.1	序言	97
5.2	想定したサービスエリア	99
5.3	鏡面系の選定	101

5.4	素子アンテナの選定	101
5.4.1	基本ビームモードによる簡易設計法	101
5.4.2	厳密解との比較	110
5.5	給電アレーの決定	116
5.5.1	アレー開口面の決定	116
5.5.2	素子アンテナの配列の決定	116
5.6	給電アレー励振分布の決定法	122
5.6.1	励振分布の必要条件	122
5.6.2	最低利得を最大とするアレー励振分布決定アルゴリズム	126
5.6.3	ビーム間アイソレーションを考慮したアレー励振分布決定アルゴリズム	130
5.7	最低利得を最大とするマルチ成形ビームアンテナの設計	133
5.8	ビーム間アイソレーションを考慮したマルチ成形ビームアンテナの設計	138
5.9	試作アンテナの放射特性	143
5.10	結言	147
6	結論	148
A	各スカラー、ベクトルの偏微分	159

表目次

1.1 インテルサット衛星搭載 4 GHz 帯マルチビームアンテナ	2
3.1 目的とするビーム偏向方向	60
5.1 サービスエリア内の地球局の位置	100
5.2 α_j の値 (1 ホーンの場合)	105
5.3 α_j の値 (7 ホーンの場合)	105
5.4 地球局方向への放射レベル (V 偏波) [dBi]	134
5.5 地球局方向への放射レベル (H 偏波) [dBi]	135
5.6 地球局方向への放射レベル (V 偏波) [dBi]	139
5.7 地球局方向への放射レベル (H 偏波) [dBi]	140

目次

1.1 インテルサット6号系搭載4GHz帯アンテナ	6
1.2 インテルサット6号系衛星	6
2.1 鏡面系の設計パラメータ	14
2.2 鏡面を表わす座標系	14
2.3 等価オフセットパラボラのパラメータ	16
2.4 焦点から離れた位置にある光源から出た光線のレイトレース	18
2.5 波面と面素	20
2.6 観測点を表わす座標系	21
2.7 一次放射路の設定	23
2.8 OC形式マルチビームアンテナのパラメータ	25
2.9 OC形式マルチビームアンテナの問題点	26
2.10 θ_0 , α と h との関係	27
2.11 OC形式マルチビームアンテナの設計例	28
2.12 ビーム偏向方向を表わす座標系	28
2.13 OCアンテナのビーム偏向による利得の変化	29
2.14 OCアンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化	29
2.15 OG形式マルチビームアンテナのパラメータ	30
2.16 OG形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 15^\circ$	33
2.17 OG形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 20^\circ$	34
2.18 OG形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 25^\circ$	35
2.19 OG形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 30^\circ$	36

2.20	OG 形式マルチビームアンテナにおける 一次放射器と副反射鏡の大きさ . . .	37
2.21	OG アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 15^\circ$	38
2.22	OG アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 20^\circ$	39
2.23	OG アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 25^\circ$	40
2.24	OG アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 30^\circ$	41
2.25	OG アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 15^\circ$	42
2.26	OG アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 20^\circ$	43
2.27	OG アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 25^\circ$	44
2.28	OG アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 30^\circ$	45
3.1	鏡面を表わす座標系	49
3.2	副反射鏡の利用領域	50
3.3	収差のない理想副反射鏡	51
3.4	鏡面修整の効果	55
3.5	オフセットグレゴリアンアンテナの形状	57
3.6	ビーム偏向方向を表わす座標系	57
3.7	鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向による利得の変化 (EL ビーム偏向時)	58
3.8	鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向による交差偏波レベ ルの変化 (EL ビーム偏向時)	58
3.9	オフセットグレゴリアンアンテナの形状	60
3.10	鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向による利得の変化 (二 次元ビーム偏向時)	61
3.11	鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向による交差偏波レベ ルの変化 (二次元ビーム偏向時)	62
3.12	繰り返し回数による利得の変化	64
4.1	鏡面設計パラメータ	67
4.2	FFOC 形式マルチビームアンテナのパラメータ	68

4.3	FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 10^\circ$ (1/2)	71
4.3	FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 10^\circ$ (2/2)	72
4.4	FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 15^\circ$	73
4.5	FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 20^\circ$	74
4.6	FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 25^\circ$	75
4.7	FFOC 形式マルチビームアンテナにおける 一次放射器と副反射鏡の大きさ	76
4.8	FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 10^\circ$	77
4.9	FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 15^\circ$	78
4.10	FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 20^\circ$	79
4.11	FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 25^\circ$	80
4.12	FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 10^\circ$	81
4.13	FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 15^\circ$	82
4.14	FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 20^\circ$	83
4.15	FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 25^\circ$	84
4.16	衛星搭載用 FFOC 形式マルチビームアンテナ	85
4.17	FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 ($L_s = L_m$)	86
4.18	FFOC 形式マルチビームアンテナにおける 一次放射器と副反射鏡の大きさ ($L_s = L_m$)	87
4.19	衛星搭載用 FFOC アンテナの設計例	88
4.20	衛星搭載用 FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化	90
4.21	衛星搭載用 FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化	91
4.22	試作 FFOC アンテナの概略構成	93
4.23	試作したコルゲート円錐ホーン	93
4.24	測定中の試作 FFOC アンテナ	94
4.25	試作 FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化測定結果	94
4.26	試作 FFOC アンテナのビーム偏向時の放射パターン測定結果	95
5.1	想定したサービスエリア	99

5.2	基本ビームを構成する素子アンテナ	102
5.3	アレー給電オフセットパラボラアンテナのパラメータ	103
5.4	基本ビームの構成	103
5.5	点 P, Q での能率 η_0 (1 ホーン)	108
5.6	点 P, Q での能率 η_0 (7 ホーン)	109
5.7	7 素子ホーンの配列	110
5.8	7 素子ホーンアレー給電アンテナの利得	112
5.9	7 素子ホーンアレー給電アンテナの放射パターン (通常円錐ホーン)	113
5.10	7 素子ホーンアレー給電アンテナの放射パターン (コルゲート円錐ホーン)	114
5.11	7 素子ホーンアレー給電アンテナの放射パターン (矩形ホーン)	115
5.12	アレー開口面の決定	117
5.13	素子アンテナの配列の規則	119
5.14	素子アンテナの配列 (V 偏波用)	120
5.15	素子アンテナの配列 (H 偏波用)	120
5.16	素子アンテナの配列 (全素子)	121
5.17	アレー給電反射鏡アンテナ	123
5.18	地球局のグループ分け	126
5.19	最低利得を最大とするアレー励振分布決定アルゴリズム	127
5.20	地球局のグループ分け	130
5.21	ビーム間アイソレーションを考慮したアレー励振分布決定アルゴリズム	131
5.22	ビーム A, C の放射パターン計算値	136
5.23	ビーム F, H, J の放射パターン計算値	136
5.24	ビーム B, D の放射パターン計算値	137
5.25	ビーム E, G, I の放射パターン計算値	137
5.26	ビーム A, C の放射パターン計算値	141
5.27	ビーム F, H, J の放射パターン計算値	141
5.28	ビーム B, D の放射パターン計算値	142

5.29	ビーム E, G, I の放射パターン計算値	142
5.30	給電アレーの外観	144
5.31	ビーム A, C の放射パターン測定値	145
5.32	ビーム B, D の放射パターン測定値	145
5.33	ビーム B, D の放射パターン測定値 (ビーム間アイソレーションを考慮)	146

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

インテルサット (International Telecommunications Satellite Organization, 国際電気通信衛星機構) による国際衛星通信においては, 1965 年に初の静止衛星による商業通信を開始して以来, 回線需要の伸びに応じてインテルサット 1 号系からインテルサット 6 号系まで逐次性能の向上した衛星が使用されてきた [1]. これに伴い, 衛星に搭載されるアンテナにおいても, グローバルビームアンテナから成形ビームアンテナ, さらにマルチビームアンテナへと新技術が導入された. これは, マルチビームアンテナを用いると, シングルビームアンテナを用いる場合に比べて, 衛星搭載アンテナが大型化する反面, 周波数の再利用, 搭載アンテナの高利得化ができるため, 通信容量の増大, 地球局アンテナの小型化が可能になるという利点があるためである.

インテルサット衛星搭載 4/6 GHz 帯アンテナにおいては, インテルサット 4 号系で初めてマルチビームアンテナが採用された. このアンテナは, オフセットパラボラ反射鏡をビームの数だけの給電アレーで給電する, アレー給電反射鏡形式のマルチビームアンテナである. これらの給電アレーは複数の円錐ホーンアンテナより構成され, それぞれの円錐ホーンアンテナを適当な励振振幅位相で給電することにより, 形状と放射方向の異なる複数本のビームが形成されるものである. 以来, 表 1.1 に示すようにそのビームの数は増加する傾向にある. すなわち, インテルサット 4 号系 [2, 3] においては 2 本の半地球ビームを用いたマルチビームアンテナであったものが, インテルサット 5 号系 [4, 5] では地球の一部をサービスエリアとする 2 本のゾーンビームを加えて計 4 本, さらにインテルサット 6 号系 [6, 7] においては

表 1.1: インテルサット衛星搭載 4 GHz 帯マルチビームアンテナ

衛星	4 号系	5 号系	6 号系
開口径	1.34m	2.44m	3.20m
ビーム数	半地球ビーム 2 本	半地球ビーム 2 本 ゾーンビーム 2 本	半地球ビーム 2 本 ゾーンビーム 4 本
ホーン数	37 本	88 本	146 本

ゾーンビームの数を 4 本に増やし計 6 本のビームを有するマルチビームアンテナが搭載されている。また、これに伴いアンテナ開口径も大きくなってきており、例えば 4 GHz 帯アンテナでは、インテルサット 4 号系では 1.34 m であったものがインテルサット 6 号系では 3.2 m となっている。アンテナ開口径を大きくすると、1 本の円錐ホーンアンテナのみを給電したときのビーム半値幅が細くなるために、一定の大きさのサービスエリアを覆うのに必要な円錐ホーンアンテナの数は増えるが、その分、ビーム形状をサービスエリアの形状に近付ける能力、すなわち、ビーム成形能力は向上する。将来的には、地球を多数の細いゾーンビームでカバーするようなマルチビームアンテナとなることが予想される [8]。また、各ビームも必要とされる通信容量に応じて決まるサービスエリアの形状に対応した成形ビームとなるものと思われる。

本研究は、このような将来の要求に応え得るマルチビームアンテナを反射鏡形式で実現する場合における、鏡面系および給電アレーの設計法をテーマとするものであり、研究の主要な内容は次のとおりである。

(1) ビーム偏向による性能劣化の小さい鏡面系の研究

国際衛星通信においては全地球がサービスの対象であり、静止衛星を用いる場合、そのサービスエリアは視直径約 20° (厳密には 17.34°) の真円である。従って、反射鏡を複数個の一次放射器で給電することにより、このサービスエリアを多数の細いビームで覆おうとすると、反射鏡には最大 10° のビーム偏向が要求される。これまでのインテルサット衛星は、搭載アンテナとしてオフセットパラボラ形式を用いているが、この場合、アンテナの開口径をさらに大型化して細いビームとした場合には、収差による利得低下やサイドローブレベル上昇、

また、交差偏波レベル上昇等の性能劣化が顕著となる。本研究ではアンテナ開口径は 120 波長程度 (ビーム半値幅 0.5° 程度) を想定しており、最大 10° のビーム偏向時におけるこれらの性能劣化の小さい鏡面系の開発がテーマとなる。なお、要求される性能は、利得低下 3 dB 以下、交差偏波レベル -30 dB 以下である。

(2) サービスエリアを効率よく覆うビームを実現する給電アレーの研究

サービスエリアの形状に対応した成形ビームを複数個放射するマルチ成形ビームアンテナの設計においては、各サービスエリア周辺の利得をできるだけ高くすることと共に、同一偏波で用いられるビーム間のアイソレーションを所望の値以上にすることが重要である。アレーアンテナで給電した反射鏡アンテナを用いたマルチ成形ビームアンテナにおいては、給電アレーを構成する素子アンテナの形状と配列、また、各素子アンテナの励振振幅位相がこれらの性能に大きく寄与する。従って、サービスエリアを高い利得で覆い、かつ、十分なビーム間アイソレーションがとれるような給電アレーの設計法の開発がテーマとなる。なお、ビーム間アイソレーションは 30 dB 以上が要求されている。

1.2 従来の研究の概要

1.2.1 鏡面系の研究

反射鏡アンテナでは、これを給電する一次放射器の位置を偏位することにより、その偏位方向および偏位量に応じてアンテナから放射されるビームの方向を変えることができる [9]。従って、反射鏡アンテナの焦点近傍に複数個の一次放射器を配列すれば、それぞれの一次放射器から放射された電磁波は反射鏡で反射された後それぞれ異なる方向に放射され、結局、一次放射器の数だけのビームを有するマルチビームアンテナが実現できる。ところが、鏡面系は通常、その焦点に球面波源を配置した場合のみアンテナ開口上で平面波となるよう設計されているため、一次放射器の位置を焦点から偏位した場合のアンテナ開口上の波面には平面からのずれ、いわゆる収差を生じる。電磁波は波面の法線方向に放射されるため、アンテナ開口上の波面に収差があると電磁波は所望の方向以外の方向にも放射され、利得低下やサイドローブレベル上昇等の性能劣化を引き起こす。

反射鏡アンテナをマルチビームアンテナとして用いるための研究は、古くから各方面で行われてきた [10, 11]。研究の対象となった鏡面系の形式としては、1 枚反射鏡形式では、回転対称パラボラアンテナ、オフセットパラボラアンテナ、球面鏡アンテナ、トーラス反射鏡アンテナがある。また、複反射鏡形式では、回転対称なカセグレンアンテナやグレゴリアンアンテナ、これらをオフセット形式にしたオフセット複反射鏡アンテナがある。複反射鏡の場合には、主反射鏡、副反射鏡の一方または両方を回転二次曲面以外の修飾鏡面としたものや、球面鏡、トーラス反射鏡としたものもある。これらのうち、球面鏡やトーラス反射鏡を用いた鏡面系は、ビーム偏向方向にかかわらず同じ性能が得られる点で優れているが、ビームによって使用する開口領域が異なるために反射鏡の実開口径が大きくなり、重量や大きさに制約のある衛星搭載用としては適していない。3 枚以上の反射鏡を用いたアンテナについても研究はされているが、地球局アンテナへの適用を想定したものである。

一次放射器を偏位した場合のアンテナの性能は、当初、回転対称パラボラアンテナに対して研究された。まず、 $Ruze$ は、焦点距離 f_m と開口径 D_m との比 f_m/D_m と、ビーム偏向角度 Θ_b とビームの半値幅 Θ_3 との比 Θ_b/Θ_3 とによってビーム偏向特性を表すチャートを示している [12]。なお、本研究ではアンテナ開口径は 120 波長程度 (ビーム半値幅 0.5° 程度)、最大ビーム偏向角 10° を想定しており、これは、約 20 ビーム幅のビーム偏向に対応する。この文献によると、 f_m/D_m が大きいほど、ビーム偏向時の利得低下は小さい。例えば、20 ビーム幅のビーム偏向時の利得低下は、 $f_m/D_m = 1.0$ の場合で 0.8 dB、 $f_m/D_m = 0.5$ の場合で約 6 dB となる。また、*Imbriale* らは、開口径 2.7 m、 $f_m/D_m = 0.4$ の回転対称パラボラ反射鏡のビーム偏向特性を 7.9 GHz で測定しており、例えば、ビーム偏向角度 10° (10.3 ビーム幅) における利得低下は約 5.0 dB、ビーム偏向角度 15° (14.5 ビーム幅) における利得低下は約 7.5 dB である [13]。ただし、回転対称な反射鏡アンテナでは、ビーム数、すなわち、一次放射器の数が増えるに従ってブロッキングが増えるという欠点があり、国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナとして実用化された例はない。

オフセットパラボラアンテナは、一次放射器によるブロッキングが無く、構成が簡単ことからマルチビームアンテナ [14, 15, 16] や成形ビームアンテナ [17, 18, 19] への適用を前提とした多くの研究がなされている。その多くはオフセットパラボラアンテナのビーム偏向特

性の計算例や測定例を示したものであるが、これらを一般的に評価する簡易式を示しているものとしては Lee らの論文がある [20]。これは、多量の計算結果から導出した実験式であり、焦点距離 f_m とベアレントパラボラの開口径 D_p との比 f_m/D_p と Θ_b/Θ_3 とでビーム偏向特性を評価するものである。ここで、ベアレントパラボラとは、オフセットパラボラの鏡面を含む回転対称なパラボラのことである。また、浦崎らは、基本ビームモード展開 [21, 22] を用いた収差解析結果からビーム偏向特性を評価する簡易式を導出し、ビーム偏向角度が小さい場合には電流分布法による厳密解とよく一致することを示している [23]。この論文によると、Lee らの簡易式は $f_m/D_p = 0.7$ あたりではよい近似であるがこれから離れるに従って近似の精度が悪くなるとしている。いずれにしても、20 ビーム幅のビーム偏向時における利得低下は f_m/D_p が 1.0 の場合で 1 dB 程度、0.7 の場合で 3 dB 程度、0.5 の場合では 10 dB 程度となる。このように、 f_m/D_p を大きく選べば、ビーム偏向による利得低下の小さいアンテナを実現できるが、 f_m/D_p の大きいオフセットパラボラは、反射鏡と一次放射器との間隔が必然的に大きくなり、また、一次放射系も大きくなる。従って、衛星搭載用を前提にすると、その値に上限がある。例えば、インテルサット 6 号系に搭載されている 4 GHz 帯アンテナは、図 1.1 に示すような、 f_m/D_p が 0.43 程度のオフセットパラボラである。図 1.2 にインテルサット 6 号系の衛星全体の図を示すが、反射鏡と一次放射器との間隔がかなり大きく、また、一次放射系自体も大きい。従って、国際通信衛星搭載用としては、これが f_m/D_p の上限であると思われる。また、オフセットアンテナでは、非対称な鏡面を用いるため、交差偏波成分の発生が避けられないという欠点もある。

カセグレンアンテナやグレゴリアンアンテナなどの回転対称複反射鏡アンテナは、等価的に f_m/D_p を大きくでき、かつ、反射鏡と一次放射器との間隔の小さいコンパクトな形状で鏡面系を構成できる。しかし、回転対称パラボラアンテナ同様、ビーム数、すなわち、一次放射器の数が増えるに従ってブロッキングが増えるという欠点がある。

オフセット複反射鏡アンテナは、一次放射器や副反射鏡、また、これらを支持する構造物によるブロッキングが無く、また、等価的に f_m/D_p を大きくでき、かつ、実用的な大きさの鏡面系を構成できる。また、この形式では、交差偏波消去条件 [24] の適用により低交差偏波の性能も期待できる。まず、Ohm が、回転対称なカセグレンアンテナの一部を切り取って得られ

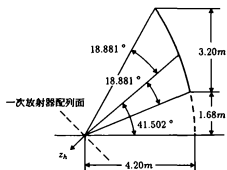


図 1.1: インテルサット 6 号系搭載 4GHz 帯アンテナ

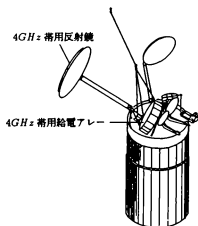


図 1.2: インテルサット 6 号系衛星

るオフセットカセグレンアンテナを等価パラボラの手法を用いて回転対称パラボラに置き換え、Ruzeの手法[12]によりビーム偏向特性を評価することを提案した[25]。これは、回転対称カセグレンアンテナにおける等価パラボラの手法[26]をオフセットカセグレンアンテナに適用したものであるが、等価パラボラの求め方に問題がある。また、Akagawaらは、オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向特性について計算値と実測値との比較を行い、良い一致を得ている[27]。これによると、鏡面設計パラメータは不明であるが、交差偏波消去条件を満足する開口径91波長のアンテナで 3° までビーム偏向した場合の利得低下は約10 dB、交差偏波レベルは-26 dBである。また、等価パラボラによる性能評価についても言及し、ビーム偏向方向については良く一致するが利得低下については有効とは言えないとしている。Krichevskyらは、オフセットカセグレンアンテナをマルチビームアンテナとして用いる場合における一次放射器の最適配置位置について検討しており[28, 29]、その中で、ビーム偏向特性計算値を示している。これによると、鏡面設計パラメータは開口径も含めて不明であるが、ビーム幅約 1° のビームを 9° まで偏向した場合の利得低下は約8 dBである。また、Krichevskyらは、オフセットグレゴリアンアンテナについても同様の検討を行っており[30]、ビーム幅約 0.45° のビームを 6° まで偏向した場合の利得低下は約5 dBである。いずれにしても、オフセット複反射鏡アンテナの設計パラメータとビーム偏向特性との関係を体系的に論じた例は無い。

回転二次曲面鏡よりなるオフセット複反射鏡アンテナでは、ビーム偏向角度が大きい場合には収差による利得低下が大きく、従来の研究の範囲では要求を満たすものは無い。そこで、これを鏡面修整して収差を低減する手法が種々提案されている。その代表的なものがRay Lattice Methodを用いた双焦点複反射鏡アンテナである。これは、Brownらにより研究された双焦点誘電体レンズの考え方[31]を鏡面に適用したものであり、2つのビーム偏向方向に対して収差を全く生じないアンテナである。このアンテナは、正面方向では収差を生じるため利得が低下するが、正面方向から離れた2つの方向に対しては利得低下が無いため、この2つの方向を含む一次的なビーム偏向に有効である。双焦点複反射鏡アンテナの研究は、当初、回転対称な鏡面に対して行われ[32, 33, 34]、その後、回転対称双焦点複反射鏡アンテナの一部を用いてオフセット形式にしたもの[35]、さらには、Ray Lattice Methodを用い

た厳密なオフセット形式のものが報告されている [36, 37]. また, *Albertsen* らは, 双焦点複反射鏡アンテナの欠点である正面方向での利得低下を改善する鏡面設計手法を示し, 数値計算によりその有効性を示している [38]. 二次元的なビーム偏向に適した複反射鏡アンテナとしては, 本研究と相前後して, 水口らが, 2 枚の反射鏡を, 複数のビーム偏向方向に対する取差を最小とするよう鏡面修整する手法を示し [39], 数値計算および実測により, その有効性を示している [40].

1.2.2 給電アレーの研究

反射鏡アンテナを複数個の素子アンテナで励振するアレー給電反射鏡アンテナは, 複数本の成形ビームを簡単な構成で実現できるため, 衛星搭載用として各国で検討および実用化されている [41, 42, 43, 44]. このような形式のマルチ成形ビームアンテナにおいては, 鏡面の形式と大きさと共に, 給電アレーを構成する素子アンテナの形状と配列, また, 各素子アンテナの励振振幅位相が, サービスエリア周辺での利得やビーム間アイソレーションに大きく寄与する.

1 本の成形ビームについて考えると, 成形ビームは, 放射方向の異なるペンシルビームを適当な励振振幅位相で合成したものだと考えることができる. このペンシルビームを基本ビームとよぶことにする. このとき, 基本ビームを合成して成形ビームを実現するためには, 隣接する基本ビームのクロスオーバーレベルを $-2.5 \sim -6$ dB に選ぶのがよいとされている [48, 49]. また, サービスエリア周辺での利得やビーム間アイソレーションは, 基本ビームの利得とサイドローブレベルとに依存することになる. 一方, 1 本の素子アンテナによって給電された反射鏡アンテナから放射されるビームをコンポーネントビームとよぶことにする. 1 本の基本ビームが 1 本のコンポーネントビームで構成されるという考え方もあるが, クロスオーバーレベルを $-2.5 \sim -6$ dB に選ぶと, 反射鏡でのエッジレベルは必然的に $-2.5 \sim -6$ dB になり, この場合, アンテナの能率は低く, また, サイドローブレベルも高くなる. 従って, 1 本の基本ビームは何本かのコンポーネントビームを合成したものだとする方が合理的である. クラスタ給電を用いたマルチスポットビームアンテナはこの考えに基づくもので, この場合には, 成形ビームアンテナとは異なり, 各基本ビームがそのまま放射されることになる. 従って, 給電アレーを構成する素子アンテナの形状と配列は, 基本ビームの放射特性が, 利得が高

く、かつ、低いサイドローブレベルとなるよう決定する必要がある。サイドローブレベルに注目した報告として、Chenらは、3本のコンポーネントビームで1本の基本ビームを構成するものとして低サイドローブ特性を実現する基本構成を提案し、実験により確認している[45]。また、7本の円錐ホーンを基本構成とする場合において、ホーン開口径とアンテナ効率、サイドローブレベルの関係を計算した例もある[50, 51]。鹿子嶋らは、正方形ホーンを9本四角配列したものを基本構成とし、低サイドローブを実現するホーン開口径を求めている[46]。さらに、素子アンテナ自体の研究も行なわれており、Adatiaらは円錐ホーンに比べて密に配列できる六角形ホーンを提案している[47]。

アレー給電反射鏡アンテナにおけるアレー励振分布決定法としては、最小二乗法[52, 58]、方向拘束付出力電力最小化法[53]、ミニマックス法[54, 55, 56]などが知られている。これらはいずれも、アレー励振分布を徐々に更新することにより、各地球局方向への放射電力とあらかじめ与えておく放射電力目標値との差を何らかの意味において最小とするものである。なお、アレー励振分布の更新の手法としては、最急降下法、ニュートン法、共役勾配法、Powell法などの非線形最適化手法[57]が用いられる。また、逆に、所望の遠方界パターンから直接給電アレー位置における電界を求め、アレー励振分布を決定する方法もある[59, 60]。これらのアレー励振分布決定法は、地球局の数が素子アンテナの数より多い場合、例えば、サービスエリアが領域で与えられこれを多数の仮想地球局で代表させる場合に有効である。

1.3 本研究の概要

1.3.1 鏡面系の研究

第2章では、従来のオフセット複反射鏡形式であるオフセットカセグレン(OC)アンテナとオフセットグレゴリアン(OG)アンテナを国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナに適用する場合の問題点を明らかにした。まず、一次放射器を任意の位置に配置した場合の放射特性を、副反射鏡は幾何光学、主反射鏡は電流分布法で計算するための理論式を示した。次に、自由度のある6個の鏡面設計パラメータを交差偏波消去条件、ブロッキングを避ける条件等を用いて2個に減じ、これらの設計パラメータと実現できる鏡面構成およびそのビーム偏向特性との関係を示した。その結果、OCアンテナでは副反射鏡が大きくなり過ぎて実用

的な解が無く、また、OG アンテナでは副反射鏡が主反射鏡より小さいという実用的な鏡面構成の範囲では、収差による利得低下が 7.3 dB、交差偏波レベル -18 dB 程度の性能が限界であることを示した。

第 3 章では、従来のオフセット複反射鏡アンテナにおいて収差によって生じる利得低下やサイドローブ上昇等の性能劣化を改善するための副反射鏡鏡面修整法について研究した。この鏡面修整法は、ビーム偏向の無い場合の性能を劣化させることなくビーム偏向時の収差の発生を低減することを目的とし、また、幾何光学的にはビーム偏向方向により副反射鏡の利用範囲が異なることに着目し、副反射鏡の周辺部分のみを鏡面修整するものである。本章ではまず、鏡面設計手順および鏡面設計に必要な理論式を示し、次に、この鏡面修整法を OG アンテナに適用し、数値計算によりその有効性を確認した。その結果、設計したアンテナのビーム偏向時における収差による利得低下は最悪値で 6.5 dB から 3.3 dB へと改善できることを明らかにした。ただし、交差偏波レベルの最悪値は約 -20 dB で鏡面修整を施す前とほとんど変わらない。

第 4 章では、フロントフィードオフセットカセグレン (FFOC) アンテナを考案し、そのビーム偏向特性について研究した。このアンテナは、従来のオフセット複反射鏡アンテナと同様に 2 枚の回転二次曲面鏡で構成されるが、一次放射器が主反射鏡からのビーム放射側に配置されることが特徴である。本章ではまず、第 2 章に示した従来のオフセット複反射鏡アンテナの場合と同様、自由度のある 6 個の鏡面設計パラメータを交差偏波消去条件、ブロッキングを避ける条件等を用いて 2 個に減じ、これらの設計パラメータと実現できる鏡面構成およびそのビーム偏向特性との関係を示した。次に、衛星搭載用であることを考慮して設計パラメータを選定し、数値計算および試作モデルアンテナによる測定により、その優れたビーム偏向特性を確認した。その結果、設計したアンテナのビーム偏向時における収差による利得低下は最悪値で 2.0 dB、交差偏波レベルの最悪値は約 -38 dB であり、所期の性能を十分満足するものであることを明らかにした。

1.3.2 給電アレーの研究

第 5 章では、ビーム間アイソレーションを所望の値とする条件のもとで、サービスエリア内の地球局方向への放射電力の最小値を最大とする給電アレー設計法について研究し、これ

を *FFOC* アンテナの一次放射器として適用したマルチ成形ビームアンテナを設計した。まず、給電アレーを構成する素子アンテナの形状と大きさに最適値があることを基本ビームモードを用いた簡易式と数値計算によって明らかにした。次に、素子アンテナの配列法として、同一周波数、同一偏波の異なるビームが同一の素子アンテナを共有しない条件で自動的に素子配列を決定するアルゴリズムを示した。さらに、給電アレーを構成する素子アンテナの数がサービスエリア内の地球局の数より多い場合において地球局方向への放射電力の最小値を最大とするアレー励振分布に対する必要条件を求め、この結果にもとづいた給電アレー励振分布を決定するアルゴリズムを示した。これらを国際通信衛星搭載を想定したアレー給電 *FFOC* 形式マルチ成形ビームアンテナの一次放射器として適用し、数値計算および試作モデルアンテナによる測定によりその有効性を確認した。その結果、サービスエリアを効率よくカバーし、30 dB 以上のビーム間アイソレーションを実現するマルチ成形ビームアンテナが得られることが明らかになった。

第 2 章

オフセットカセグレン、グレゴリアン形式マルチビームアンテナの性能限界

2.1 序言

オフセットカセグレン (OC), オフセットグレゴリアン (OG) アンテナは、次のような利点があるため、衛星搭載用マルチビームアンテナへの適用を前提とした多くの研究開発がなされている [25, 28, 29, 27, 30, 62].

- 副反射鏡や一次放射器、また、これらの支持構造物によるブロッキングが無いため、高効率となる。
- 焦点距離の短いパラボラ主反射鏡を用いて等価的な f_m/D_p を大きくできる [26] ために、収差の発生 of 小さいアンテナを実用的な大きさで実現できる。
- 交差偏波消去条件 [24] を適用すれば、マルチビームアンテナでも低交差偏波の性能が期待できる。

しかし、これらはビーム偏向角が小さい場合に言えることである。インテルサット衛星のような国際通信衛星の場合、要求されるビーム偏向方向は最大 10° 程度となる。このように大きなビーム偏向角度でこれらのオフセットカセグレン、グレゴリアンアンテナを用いようとすると、次のような問題を生じる。

- 主反射鏡を各ビームで共通に使用する場合を考えると、ビーム偏向方向によって副反射鏡の利用部分が異なるため、副反射鏡が大きくなる。

- 等価パラボラ [61] による収差の評価が適用できず [27], 収差の小さい鏡面系の設計が困難になる。
- 中心ビームに対して交差偏波消去条件を満足する鏡面であっても, ビーム偏向に従って, 両反射鏡から発生する交差偏波成分にアンバランスを生じ, 交差偏波レベルが上昇する [27].
- ビーム偏向方向に対して決まる一次放射器最適配置位置が同一平面上にないため, 一次放射系の構成が複雑になる。

これらは, オフセット複反射鏡形式マルチビームアンテナが一般に有する問題点であるが, アンテナ設計パラメータとこれらの問題点との関係を体系的に論じた例は無い。

本章では, 従来のオフセット複反射鏡形式であるオフセットカセグレンアンテナとオフセットグレゴリアンアンテナを国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナに適用する場合の上記問題点を明らかにする [63]. まず, 一次放射器を任意の位置に配置したときの放射特性を, 副反射鏡の放射特性は幾何光学, 主反射鏡の放射特性は電流分布法で計算する場合の理論式を示す。次に, 自由度のある 6 個の鏡面設計パラメータを交差偏波消去条件, ブロッキングを避ける条件等を用いて 2 個に減じ, これらの設計パラメータと実現できる鏡面構成およびそのビーム偏向特性との関係を示す。その結果より, 国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナに適用する場合の性能限界を明らかにする。

2.2 鏡面系の座標系と設計パラメータ

回転二次曲面鏡よりなる複反射鏡アンテナは, 図 2.1 のように, 点 O , F を焦点とする回転二次曲面鏡である副反射鏡と, 点 F を焦点とする回転放物面鏡である主反射鏡, および, 点 O に置かれた一次放射器とで構成される。点 O を原点として, 回転放物面鏡の鏡軸を z 軸とし, 点 F が zx 面内にあるように直交座標系 xyz を設け, その座標軸に沿う単位ベクトルを i, j, k とする。鏡面の周辺は, 点 O より円錐状に放射された光線が副反射鏡, 主反射鏡と交わる曲線とする。このとき, 主反射鏡の周辺は楕円となり, xy 面に投影したとき円形となる。自由度のあるアンテナの設計パラメータは次の 6 個であり, これは鏡面構成形式によらない。

D_m : 主反射鏡開口径

$2\theta_0$: 点 O を頂角として副反射鏡周辺を見込む円錐の頂角

α : \overrightarrow{OF} と k とのなす角

β : 点 O を頂角として副反射鏡周辺を見込む円錐の軸と z 軸とのなす角

e : 副反射鏡の離心率

a : 副反射鏡の定数で $|OF| = 2ae$

さらに、図 2.2 に示すように、副反射鏡上の点 R 、主反射鏡上の点 M を表わすために、点 O を原点とする直交座標系 $x_1y_1z_1$ 、点 F を原点とする直交座標系 $x_2y_2z_2$ を定義し、それらの座標軸に沿う単位ベクトルを i_1, j_1, k_1 、および i_2, j_2, k_2 とする。さらに、 z_1 軸を極軸とする極座標系を $r_0\theta_1\phi_1$ 、 z_2 軸を極軸とする極座標系を $r_p\theta_2\phi_2$ と定義し、 r_0 軸、 r_p 軸に沿う単位ベクトルを e_r, e_p とする。

このとき、副反射鏡上の点 R は次のように表わされる。

$$\overrightarrow{OR} = r_0(\theta_1, \phi_1)e_r \quad (2.1)$$

$$e_r = \sin\theta_1(\cos\phi_1 i_1 + \sin\phi_1 j_1) + \cos\theta_1 k_1 \quad (2.2)$$

ここで $r_0(\theta_1, \phi_1)$ は、回転二次曲面鏡の場合、次式で表わされる。

$$r_0 = \frac{\delta p a (z^2 - 1)}{1 + \bar{z} e_r \cdot l} \quad (2.3)$$

$$l = \sin\alpha i + \cos\alpha k \quad (2.4)$$

ここで、 $\bar{z} = \delta p e$ であり、 δ は 1 のとき凹面鏡、-1 のとき凸面鏡を表わし、 p は 1 のとき回転双曲面鏡、-1 のとき回転楕円面鏡を表わす。

主反射鏡上の点 M は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OM} &= r_m(\theta_2, \phi_2) \\ &= \overrightarrow{OF} + r_p(\theta_2, \phi_2)e_p \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\overrightarrow{OF} = 2ae l \quad (2.6)$$

$$r_p = \frac{2f_m}{1 - e_p \cdot k} \quad (2.7)$$

$$e_p = \sin\theta_2(\cos\phi_2 i_2 + \sin\phi_2 j_2) + \cos\theta_2 k_2 \quad (2.8)$$

なお、 e_p は副反射鏡を表わすパラメータを用いると、次式で与えられる。

$$e_p = \frac{(z^2 - 1)e_r - 2\bar{z}(1 + \bar{z}l \cdot e_r)l}{\bar{z}^2 + 1 + 2\bar{z}l \cdot e_r} \quad (2.9)$$

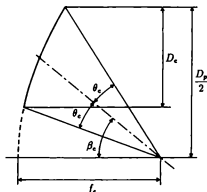


図 2.3: 等価オフセットパラボラのパラメータ

また, f_m は主反射鏡の焦点距離を表わしており, 開口径 D_m を与えれば次式より決定される.

$$f_m = p \frac{D_m}{2} \frac{1}{\frac{e_{p1} \cdot i}{1 - e_{p1} \cdot k} - \frac{e_{p2} \cdot i}{1 - e_{p2} \cdot k}} \quad (2.10)$$

ここで, e_{p1} , e_{p2} はそれぞれ, $\theta_1 = \theta_0$ かつ $\phi_1 = 0$, $\theta_1 = \theta_0$ かつ $\phi = \pi$ に対応して決まる e_p を表わしている.

2.3 等価オフセットパラボラによる検討

幾何光学的に考えたとき, 回転二次曲面鏡よりなるオフセット複反射鏡アンテナの電磁界の開口分布と同一の開口分布を有する単一のオフセットパラボラが存在する. これを等価オフセットパラボラと呼び, パラメータは次のように表わされる [61].

$$D_e = D_m \quad (2.11)$$

$$\theta_e = \theta_0 \quad (2.12)$$

$$\tan \frac{\beta_e}{2} = -p \frac{\bar{z} \sin \left(\alpha - \frac{\beta}{2} \right) - \sin \frac{\beta}{2}}{\bar{z} \cos \left(\alpha - \frac{\beta}{2} \right) + \cos \frac{\beta}{2}} \quad (2.13)$$

$$f_c = \frac{D_c}{2} \frac{1}{\tan \frac{\beta_c + \theta_c}{2} - \tan \frac{\beta_c - \theta_c}{2}} \quad (2.14)$$

$$D_p = 4f_c \tan \frac{|\beta_c| + \theta_c}{2} \quad (2.15)$$

ここで、 f_c は等価オフセットパラボラの焦点距離、 D_p は、等価オフセットパラボラの鏡面を含む回転対称なパラボラ、すなわち、ペアレントパラボラの直径である。また、開口径 D_c と一次放射器から反射鏡を見込む角 θ_c は、もとの複反射鏡アンテナでの値 D_m, θ_0 と同じで、オフセット角 β_c が副反射鏡の設計パラメータ e, α, β で決まることになる。このとき、等価オフセットパラボラのペアレントパラボラの開口径 D_p と焦点距離 f_c との比 f_c/D_p は次のようになる。

$$\frac{f_c}{D_p} = \frac{1}{4 \tan \frac{|\beta_c| + \theta_c}{2}} \quad (2.16)$$

これより明らかなように、 θ_c を固定すると、 f_c/D_p は β_c が 0 のときに最大となる。この条件は、等価パラボラが回転対称となる条件であり、交差偏波消去条件と一致する。この条件は、式 (2.13) より次のようになる。

$$\bar{e} = -\frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\sin \left(\alpha - \frac{\beta}{2} \right)} \quad (2.17)$$

このとき、式 (2.16) は次のようになる。

$$\frac{f_c}{D_p} = \frac{1}{4 \tan \frac{\theta_c}{2}} \quad (2.18)$$

従って、等価パラボラが回転対称パラボラとなるのは、Ohm が述べているような [25] 回転対称なカセグレンアンテナの一部を切り取って得られるオフセットカセグレンアンテナではなく、Akagawa らが試みたような交差偏波消去条件を満足する鏡面系 [27] である。また、 θ_c 、すなわち、 θ_0 が小さいほど f_c/D_p を大きくできることがわかる。

以上に述べた等価パラボラによる検討より、回転二次曲面鏡よりなる複反射鏡アンテナをマルチビームアンテナとして用いる場合には、交差偏波消去条件を満足するように設計パラメータを選び、かつ、副反射鏡見込み角 θ_0 を小さく選べば、収差による性能劣化を小さくできる可能性がある。

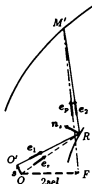


図 2.4: 焦点から離れた位置にある光源から出た光線のレイトレース

2.4 焦点から離れた位置にある光源より出た光線のレイトレース

焦点 O から s だけ移動した点 O' に置かれた光源から出た光線が副反射鏡、主反射鏡にあたる点を R, M' とし、点 R を図 2.2 に示した θ_1, ϕ_1 を変数として表わすと、点 M' は以下のように計算できる。点 O' から副反射鏡上の点 R に向かうベクトルを次のように表わす。

$$\overrightarrow{O'R} = l_1 e_1 = r_0 e_r - s \quad (2.19)$$

$$e_1 = \frac{r_0 e_r - s}{l_1} \quad (2.20)$$

$$l_1 = \sqrt{r_0^2 - 2r_0 e_r \cdot s + s^2} \quad (2.21)$$

このとき、点 R における単位法線ベクトル n_s は、

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{\frac{\partial(r_0 e_r)}{\partial \theta_1} \times \frac{\partial(r_0 e_r)}{\partial \phi_1}}{\left| \frac{\partial(r_0 e_r)}{\partial \theta_1} \times \frac{\partial(r_0 e_r)}{\partial \phi_1} \right|} \\ &= \frac{r_0 e_r - \frac{\partial r_0}{\partial \theta_1} e_\theta - \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial r_0}{\partial \phi_1} e_\phi}{\sqrt{r_0^2 + \left(\frac{\partial r_0}{\partial \theta_1} \right)^2 + \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial r_0}{\partial \phi_1} \right)^2}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

ここで,

$$e_\theta = \cos \theta_1 (\cos \phi_1 i_1 + \sin \phi_1 j_1) - \sin \theta_1 k_1 \quad (2.23)$$

$$e_\phi = -\sin \phi_1 i_1 + \cos \phi_1 j_1 \quad (2.24)$$

である。これより、点 R から主反射鏡上の点 M' に向かう光線に沿う単位ベクトル e_2 は、

$$e_2 = e_1 - 2(e_1 \cdot n_s)n_s \quad (2.25)$$

となる。このとき、点 M' の座標は次のように求められる。

図 2.4 より次の関係が成り立つ。

$$\overrightarrow{OM'} = r_0 e_r + l_2 e_2 = 2ael + \frac{2f_m}{1 - e_p \cdot k} e_p \quad (2.26)$$

式 (2.26) の両辺で k との内積をとり、 $e_p \cdot k$ について解くと次式が得られる。

$$e_p \cdot k = \frac{r_0 e_r \cdot k + l_2 e_2 \cdot k - 2ael \cdot k}{2f_m + r_0 e_r \cdot k + l_2 e_2 \cdot k - 2ael \cdot k} \quad (2.27)$$

これを、式 (2.26) に代入し、 e_p を消去すると、結局、 l_2 に関する二次方程式が得られる。

$$Al_2^2 + 2Bl_2 + C = 0 \quad (2.28)$$

$$A = 1 - (e_2 \cdot k)^2 \quad (2.29)$$

$$B = r_0 \{e_2 \cdot e_r - (e_2 \cdot k)(e_r \cdot k)\} - 2(ae \sin \alpha e_2 \cdot i + f_m e_2 \cdot k) \quad (2.30)$$

$$C = r_0^2 \{1 - (e_r \cdot k)^2\} \quad (2.31)$$

$$-4 \{f_m^2 + f_m r_0 e_r \cdot k - ae(2f_m \cos \alpha - r_0 \sin \alpha e_r \cdot i) - a^2 e^2 \sin^2 \alpha\} \quad (2.32)$$

これより 2 つの解が得られるが、真の解は、

$$l_2 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (2.33)$$

である。

主反射鏡にあたる点 M' の座標は、式 (2.26) で求められる。

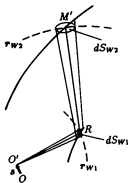


図 2.5: 波面と面素

2.5 放射特性の計算法

一次放射器からの放射特性を既知とし、副反射鏡では幾何光学的に電磁波が反射されるものとし、主反射鏡からの放射特性を電流分布法を用いて計算する。点 O' に置かれた一次放射器から放射された電磁波の波面上にとった面素を dS_{W1} 、主反射鏡に入射する点での波面の面素を dS_{W2} とする。また、対応する電界をそれぞれ E_1, E_2 とする。このとき、 $l_1 e_1$ における E_1 は既知で、次のように表わされるものとする。

$$E_1 = \frac{\exp(-jk l_1)}{l_1} (E_{1v} e_{1v} + E_{1\phi} e_{1\phi}) \quad (2.34)$$

ここで、 $e_{1v}, e_{1\phi}$ は、 e_1 に直交する単位ベクトルである。また、 E_2 を次のように表わす。

$$E_2 = (E_{2v} e_{2v} + E_{2\phi} e_{2\phi}) \exp\{-jk(l_1 + l_2)\} \quad (2.35)$$

このとき、 E_1 と E_2 とは、振幅について次の関係がある。

$$|E_2|^2 dS_{W2} = |E_1|^2 dS_{W1} \quad (2.36)$$

また、 r_{W1}, r_{W2} を、それぞれ点 R, M' における波面上の点を表わすベクトルとする。

$$r_{W1} = l_1 e_1 \quad (l_1: \text{一定}) \quad (2.37)$$

り観測点 P に向かう単位ベクトルを R とする。直交座標系 XYZ は、点 O を原点とする直交座標系 xyz を、原点が点 M_0 となるよう平行移動したものである。このとき、観測点 P における放射電界 $E_s(P)$ は、次のようになる。

$$E_s(P) = -\frac{j \exp(-jkR)}{\lambda R} \{N - (N \cdot R)R\} \quad (2.45)$$

$$N = \int_{S_m} (n_m \times \eta_0 H_2) \exp(j\Phi_0) dS_m \quad (2.46)$$

$$\Phi_0 = k \left\{ \rho \cdot R - \frac{1}{2R} [\rho^2 - (\rho \cdot R)^2] \right\} \quad (2.47)$$

$$n_m dS_m = \frac{\partial r_m}{\partial \theta_1} \times \frac{\partial r_m}{\partial \phi_1} d\theta_1 d\phi_1 \quad (2.48)$$

$$\rho = r_m - r_{m0} \quad (2.49)$$

$$H_2 = \frac{1}{\eta_0} (-E_{2\phi} e_{2\phi} + E_{2\theta} e_{2\theta}) \exp\{-jk(l_1 + l_2)\} \quad (2.50)$$

ここで、 r_{m0} は鏡面上の定点 M_0 を示すベクトル、 η_0 は自由空間のインピーダンスである。 R は、方位角 (AZ)、仰角 (EL) に対応する角度 η, ξ 、または、極座標に対応する角度 Θ, Φ を用いると次のように表わされる。

$$\begin{aligned} R &= \sin \xi i + \cos \xi (\sin \eta j + \cos \eta k) \\ &= \sin \Theta (\cos \Phi i + \sin \Phi j) + \cos \Theta k \end{aligned} \quad (2.51)$$

なお、以上の計算式に必要な各スカラー、ベクトルの偏微分は付録 A に示している。

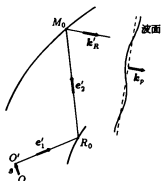


図 2.7: 一次放射器の設定

2.6 所望のビーム偏向方向に対応する一次放射器の位置

一次放射器を焦点 O 以外の位置に置くことにより、主反射鏡開口上の波面を、 k に直交する平面からずれた略平面とすることができ、その結果、ビームを k と異なる方向に向けることができる。この波面は、厳密には平面ではなく、平面からのずれ、いわゆる、収差を生じ、利得低下やサイドローブレベル上昇などの性能劣化の原因となる。従って、単位ベクトル k_R の示す方向にビーム偏向する場合、一次放射器の位置は、平面近似した開口面上の波面の法線方向 k_p が k_R と一致し、かつ、 k_R と垂直な平面上での収差が最小となるよう決定するのが妥当である。これを、次の手順によって決める。

1. 図 2.7 に示すように、主反射鏡上に定点 M_0 を決める。また、 $-k'_R$ 方向を $-k_R$ 方向に決める。
2. $-k'_R$ 方向から点 M_0 に光線を入射し、レイトレースにより、 e'_2 、点 R_0 、 e'_1 を順次求める。

3. l'_1 を変数として、一次放射器位置 O' を

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OO'} &= \overrightarrow{OR_0} - l'_1 \mathbf{e}'_1 \\ &= \mathbf{s}\end{aligned}\tag{2.52}$$

と表す。このときの k_R に垂直な平面上での取差を Δl としたとき、

$$\frac{\partial L}{\partial l'_1} = 0\tag{2.53}$$

$$L = \int_{A_s} \Delta l^2 dA_s\tag{2.54}$$

を満足するように l'_1 を決める。ここで、 Δl の計算は、レイトレース法を用いてもよいし、第 3.2.3 節に示す近似式 (3.16) を用いてもよい。なお、式 (2.54) において、 A_s は k_R に垂直な平面に写像した主反射鏡開口面積を表している。

4. 手順 3 で決定した一次放射器位置に対応した波面を平面近似し、その法線方向を k_p とするとき、 $k_p = k_R$ ならこれが解であり、この条件を満足しない場合には、 k'_R を変え、手順 2 に戻る。

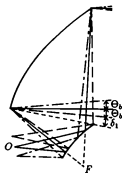


図 2.8: OC 形式マルチビームアンテナのパラメータ

2.7 オフセットカセグレン形式マルチビームアンテナの検討

2.7.1 設計パラメータの選定

第 2.2 節に示した 6 個の鏡面系の設計パラメータは、次の条件で決定する。

- 条件 (1) 主反射鏡開口径 D_m は 120 波長とする。また、ビーム偏向角度 θ_b の最大値を 10° とする。
- 条件 (2) 交差偏波消去条件を満足する鏡面系とする。
- 条件 (3) 最大値までビーム偏向したとき、副反射鏡が主反射鏡からのビームのブロッキングとならないようクリアランス δ_l を設ける。

これらの条件より残る自由度のある設計パラメータは 3 個となり、 θ_b , α , a に選ぶものとする。OC 形式の場合に問題となるのは、これら 3 個のパラメータの選び方によっては、図 2.9 に示すように、 θ_b 上方より入射した光線が主反射鏡で反射後、その一部が副反射鏡にあたらない場合があることである。これを避けるためには、 θ_b 上方より入射した平面波による主反射鏡の略焦点を F' 、また、 $\overrightarrow{FF'}$ と副反射鏡との交点を R' とし、 $|\overrightarrow{FF'}| = s_1$, $|\overrightarrow{FR'}| = s_2$, さ

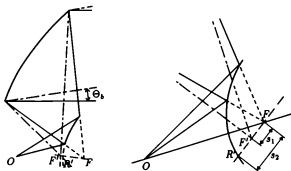


図 2.9: OC 形式マルチビームアンテナの問題点

らに,

$$h = \frac{s_2}{s_1} \quad (2.55)$$

とすると,

$$h > 1 \quad (2.56)$$

である必要がある。このとき, h を最大とする α が存在するため, 4 番目の条件として, 次の条件を与える。

- 条件 (4) α を次の条件で決める。

$$\frac{\partial h}{\partial \alpha} = 0 \quad (2.57)$$

クリアランス δ_1 を 5° に選び, 残るパラメータ θ_0 および α を変化させて h を計算した結果を図 2.10 に示す。図より, 式 (2.56) の条件を満足させるためには, θ_0 を少なくとも 5° より小さくする必要があることがわかる。

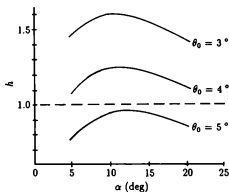


図 2.10: θ_0 , α と h との関係

2.7.2 鏡面構成例とそのビーム偏向特性

OC 形式マルチビームアンテナの構成例として、 $\theta_0 = 4^\circ$ 、 $\alpha = 10^\circ$ に選んだ場合の鏡面系の外形を図 2.11 に示す。図より明らかなように、この構成では副反射鏡の大きさは主反射鏡の大きさの数倍となる。また、一次放射器を置く範囲が広がり、平面からのずれも大きい。なお、 θ_0 を小さくすればする程、副反射鏡の大きさは大きくなる。

アンテナのビーム偏向方向を、図 2.12 に示すような方位角 (AZ)、仰角 (EL) に対応する角度 η , ξ , または、 Θ_b , Φ_b で表す。図 2.11 に示した鏡面系を、エッジレベル -10 dB のコルゲート円錐ホーンで給電した場合のビーム偏向時の放射特性計算値を示す。ビーム偏向方向は、図 2.12 において、 $\Phi_b = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の面に対して、 Θ_b を 10° まで変化させている。図 2.13 にビーム偏向による利得の変化、図 2.14 に同じく交差偏波レベルピーク値の変化を示す。図よりビーム偏向による利得低下は 1 dB 以下、交差偏波の発生は -45 dB 以下という非常に優れた性能であることがわかる。

以上により、OC 形式では θ_0 の選択に制限がある。この場合、電気的性能は非常に優れているものの、機械的には不利であり、実用的なマルチビームアンテナを構成できないことになる。

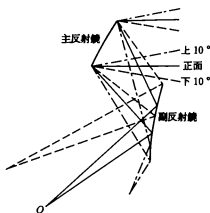


図 2.11: OC 形式マルチビームアンテナの設計例

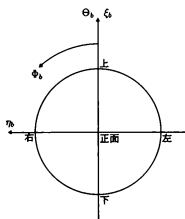


図 2.12: ビーム偏向方向を表わす座標系

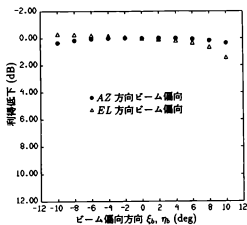


図 2.13: OC アンテナのビーム偏向による利得の変化

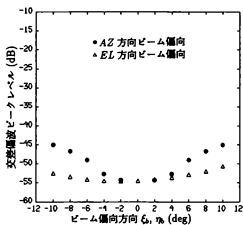


図 2.14: OC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化

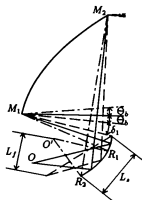


図 2.15: OG 形式マルチビームアンテナのパラメータ

2.8 オフセットグレゴリアン形式マルチビームアンテナの検討

2.8.1 設計パラメータの選定

第 2.2 節に示した 6 個の鏡面設計パラメータは、次の条件で決定する。

- 条件 (1), (2) および (3) は OC の場合と同じとする。

OG 形式の場合、4 番目の条件として、次の条件を与える。

- 条件 (4) 一次放射器が副反射鏡からのビームのブロッキングとならないよう、次の条件を満足するもののうち、最も副反射鏡の大きさが小さくなるようパラメータ a を決める。

$$\angle M_1 R_1 O' > \delta_2 \quad (2.58)$$

$$\angle M_2 R_2 O' > \delta_2 \quad (2.59)$$

なお、点 M_1 , M_2 はそれぞれ主反射鏡の下端と上端の点、点 R_1 , R_2 はそれぞれ、 Θ_0 上方より主反射鏡上の点 M_1 , M_2 に入射した光線が、副反射鏡にあたる点、点 O' は副反射鏡で反射したこれらの光線の集まる点である。

これより、自由度のある設計パラメータは θ_0 と α の二つとなる。

2.8.2 鏡面構成例とそのビーム偏向特性

δ_1 を 2° 、 δ_2 を 5° として、自由度のある二つの設計パラメータ θ_0 、 α を変化した場合の鏡面構成を図2.16～2.19に示す。図より、OG形式にすれば、実用的な大きさの鏡面系を得ることができることがわかる。また、OG形式では一次放射器位置が平面上にないため、フィードアレーとして平面アレーを用いることが難しく、給電系の構成が複雑になる欠点があることがわかる。

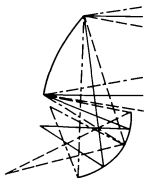
図2.15に示すように一次放射系および副反射鏡の大きさ L_f 、 L_r を定義し、図2.16～2.19よりこれらを求めた結果を図2.20に示す。図2.20の結果より次のことがわかる。

- θ_0 を小さく選ぶ程、等価パラボラの f_c/D_p は大きくなるが、副反射鏡の大きさ L_r は増す。
- θ_0 が同じ場合、 α を大きく選ぶ程、サービスエリア全体をカバーするのに必要な一次放射系全体の大きさ L_f は小さくなるが、副反射鏡の大きさ L_r は大きくなる。
- 副反射鏡の大きさ L_r と一次放射系全体の大きさ L_f の実用上の許容範囲を主反射鏡開口径 D_m 以下とすると、 $\theta_0 = 15^\circ$ 以下の場合と 30° 以上の場合は解が無く、 $\theta_0 = 20^\circ$ の場合は $13^\circ < \alpha < 15^\circ$ 、 25° の場合は、 $17^\circ < \alpha < 20^\circ$ が許容範囲となる。

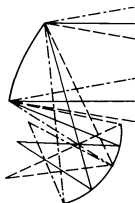
図2.16～2.19に示した鏡面系を、エッジレベル-10 dBのコルゲート円錐ホーンで給電した場合のビーム偏向時の放射特性計算値を示す。ビーム偏向方向は、OG形式の場合と同様、図2.12において、 $\phi_0 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の面に対して、 Θ_0 を 10° まで変化させている。図2.21～2.24にビーム偏向による利得の変化、図2.25～2.28に同じく交差偏波レベルピーク値の変化を示す。なお、交差偏波のピーク方向は、ビームを $\phi_0 = 0^\circ, 180^\circ$ に偏向した場合はAZ方向に、 $\phi_0 = 90^\circ, 270^\circ$ 方向に偏向した場合はEL方向にあらわれ、図にはこの値を示している。図2.21～2.28より次のことがわかる。

- θ_0 を小さく選ぶ程、ビーム偏向による利得低下や交差偏波レベルの上昇が小さい。これは、等価パラボラによる推定結果と一致する。

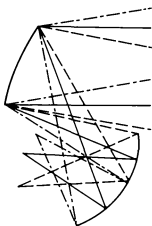
- θ_0 が同じ場合、 α を大きく選ぶ程、ビーム偏向による利得低下や交差偏波レベルの上昇が小さい。 θ_0 が同じということは等価パラボラも同じということであるが、ビーム偏向特性は微妙に異なる。ただし、その差は、 θ_0 が異なることによる差よりは小さい。
- ビームを上方向に偏向した場合の利得低下は下方向に偏向した場合に比べてかなり大きい。その原因のひとつとして、ビームを上方向に偏向する場合にはアンテナ開口径が小さく見え、逆に、下方向に偏向する場合には大きく見えるということがあるが、開口面積による利得の変化は最大 ± 0.5 dB であり、ほとんどは取差によるものである。なお、利得低下のアンバランスは 3.3 節で試みているように、ビーム方向をオフセットすることにより低減できる。
- 先に示した許容範囲では、ビーム偏向による利得低下は 7.3 dB、交差偏波レベルは -18 dB が限度である。



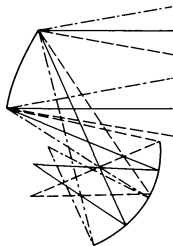
(a) $\alpha = 10^\circ$



(b) $\alpha = 14^\circ$



(c) $\alpha = 18^\circ$



(d) $\alpha = 22^\circ$

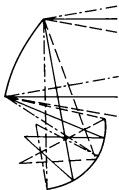
図 2.16: OG 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 15^\circ$



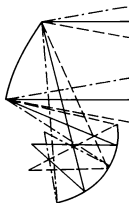
(a) $\alpha = 14^\circ$



(b) $\alpha = 18^\circ$



(c) $\alpha = 22^\circ$



(d) $\alpha = 26^\circ$

図 2.17: OG 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 20^\circ$



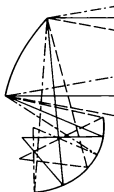
(a) $\alpha = 18^\circ$



(b) $\alpha = 22^\circ$

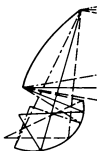


(c) $\alpha = 26^\circ$

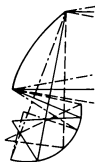


(d) $\alpha = 30^\circ$

図 2.18: OG 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 25^\circ$



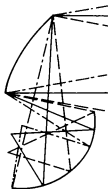
(a) $\alpha = 20^\circ$



(b) $\alpha = 24^\circ$



(c) $\alpha = 28^\circ$



(d) $\alpha = 32^\circ$

図 2.19: OG 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 30^\circ$

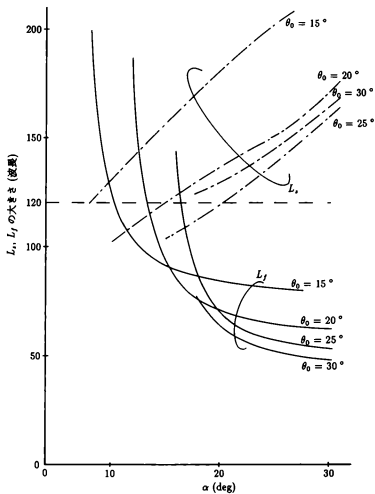
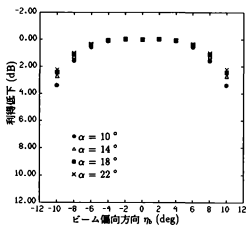
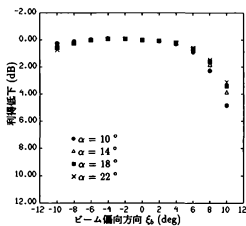


図 2.20: OG 形式マルチビームアンテナにおける一次放射器と副反射鏡の大きさ

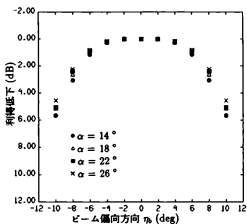


(a) AZ 方向ビーム偏向

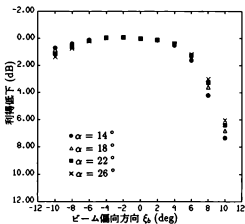


(b) EL 方向ビーム偏向

図 2.21: OG アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 15^\circ$

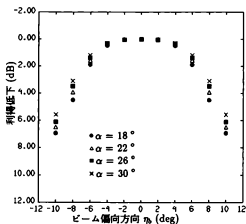


(a) AZ 方向ビーム偏向

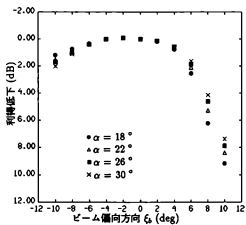


(b) EL 方向ビーム偏向

図 2.22: OG アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 20^\circ$

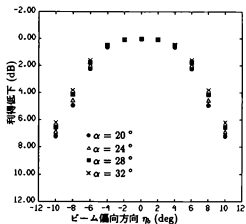


(a) AZ 方向ビーム偏向

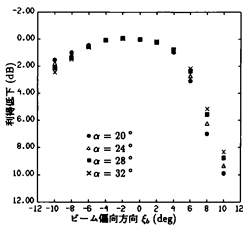


(b) EL 方向ビーム偏向

図 2.23: OG アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 25^\circ$

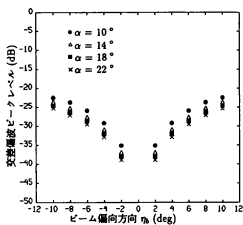


(a) AZ 方向ビーム偏向

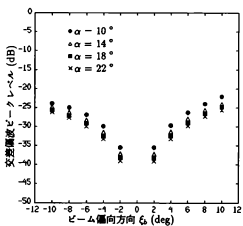


(b) EL 方向ビーム偏向

図 2.24: OG アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 30^\circ$

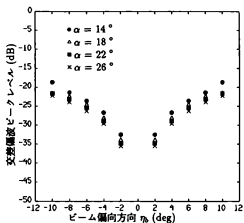


(a) AZ 方向ビーム偏向

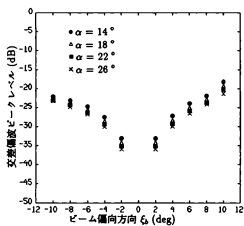


(b) EL 方向ビーム偏向

図 2.25: OG アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 15^\circ$

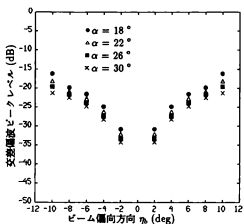


(a) AZ 方向ビーム偏向

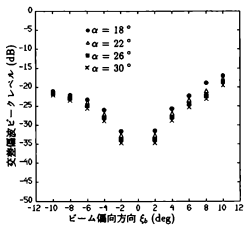


(b) EL 方向ビーム偏向

図 2.26: OG アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 20^\circ$

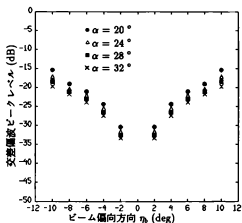


(a) AZ 方向ビーム偏向

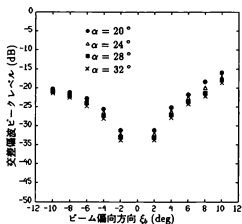


(b) EL 方向ビーム偏向

図 2.27: OG アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 25^\circ$



(a) AZ 方向ビーム偏向



(b) EL 方向ビーム偏向

図 2.28: OG アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 30^\circ$

2.9 結言

従来のオフセット複反射鏡形式であるオフセットカセグレン (*OC*) アンテナとオフセットグレゴリアン (*OG*) アンテナを国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナに適用する場合の性能限界を明らかにした。まず、一次放射器を任意の位置に配置した場合の放射特性を、副反射鏡の放射特性は幾何光学、主反射鏡は電流分布法で計算するための理論式を示した。次に、自由度のある6個の鏡面設計パラメータを交差偏波消去条件、ブロッッキングを避ける条件等を用いて2個に減じ、これらの設計パラメータと実現できる鏡面構成およびそのビーム偏向特性との関係を示した。

その結果、*OC* 形式では、電氣的性能は非常に優れているものの、機械的制約により実用的なマルチビームアンテナを構成できないこと、*OG* 形式では、実用的なマルチビームアンテナを構成できるが、ビーム偏向による利得低下は7.3 dB、交差偏波レベルは-18 dB程度の性能が限界であることが明らかになった。

第 3 章

修整副反射鏡をもつオフセットグレゴリアン形式マルチビームアンテナ

3.1 序論

回転二次曲面鏡よりなるオフセット複反射鏡アンテナでは、ビーム偏向角度が大きい場合には収差による利得低下が大きく、要求を満たすものは無い [63]。そこで、これを鏡面修整して収差を低減する手法が種々提案されている。

その代表的なものが *Ray Lattice Method* を用いた双焦点複反射鏡アンテナである。これは、Brown らにより研究された双焦点誘電体レンズの考え方 [31] を鏡面に適用したものであり、2つのビーム偏向方向に対して収差を全く生じないアンテナである。双焦点複反射鏡アンテナの研究は、当初、回転対称な鏡面に対して行われ [32, 33, 34]、その後、回転対称双焦点複反射鏡アンテナの一部を用いてオフセット形式にしたもの [35]、さらには、*Ray Lattice Method* を用いた厳密なオフセット形式のものが報告されている [36, 37]。これらのアンテナは、正面方向では収差を生じるため利得が低下するが、正面方向から離れた2つの方向に対しては利得低下が無い。このため、この2つの方向を含む一次元的なビーム偏向に有効であるが、あるサービスエリア全体に二次元的にビーム偏向する場合には最適とはいえない。

一方、*Ray Lattice Method* とは別に、鏡面系の最適値問題として取り扱う設計法がある [64]。Albertsen らは、双焦点複反射鏡アンテナの欠点である正面方向での利得低下を改善する鏡面設計手法を示し、数値計算によりその有効性を示している [38]。二次元的なビーム偏向に適した複反射鏡アンテナとしては、水口らが、2枚の反射鏡を、複数のビーム偏向方向に対する収差を最小とするよう鏡面修整する手法を示し [39]、数値計算および実験により、その有

効性を示している [40]。これは、複数のビーム偏向方向を与えたとき、それぞれのビームによる開口上の振幅、位相誤差を最小とするよう、主および副反射鏡の形状、一次放射器位置を決めるものである。この場合には、2 枚の反射鏡はいずれも修整鏡面となる。

本章では、主反射鏡の形状をオフセットパラボラに選び、目的とする複数のビーム方向での取差を最小とするよう、一次放射器の位置と副反射鏡の形状を決定する手法 [65, 66] を示す。この手法は、ビーム偏向方向によって副反射鏡の利用部分が異なることに着目して、鏡面修整は副反射鏡の周辺部分のみに施すものであり [67]、これにより、ビーム偏向の無い場合の性能を劣化させることなく、ビーム偏向時の性能を改善することができる。

本章ではまず、鏡面設計手順および鏡面設計に必要な理論式を示し、次に、この鏡面修整法を *OG* アンテナに適用し、数値計算によりその有効性を確認する。

3.2 鏡面設計法

3.2.1 設計手順

主反射鏡の形状が与えられたものとし、 N_b 個のビーム偏向方向に対する開口上の取差を最小にする鏡面設計を次の手順で行う。

1. 初期値としての副反射鏡の形状を関数で与える。
2. 与えられた鏡面系に対して、開口面上の波面と所望のビーム方向に直交する平面との差の *rms* 値が最小となるよう、2.6 節と同様にして、 N_b 個のビーム方向に対応した一次放射器位置をそれぞれ求める。
3. 一次放射器の位置と主反射鏡の形状より、取差を全く生じないような理想的な副反射鏡の形状を、 N_b 個それぞれのビームに対して求める。
4. 与えられている副反射鏡と理想的な副反射鏡との差を求め、 N_b 個のすべてのビームに対してその差が最も小さくなるような滑らかな修整関数を決める。修整量が所定の値より小さければ収束したものとし解とする。
5. 副反射鏡を表す関数に手順 4 で決まった関数を加え、これを新たな副反射鏡とする。

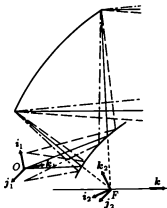


図 3.1: 鏡面を表わす座標系

6. 手順 2 に戻る。

手順 2 から 5 をくり返すことにより、 N_b 個のビーム偏向に対して最適な副反射鏡の形状および一次放射器位置が決まる。以下、それぞれの手順を具体的に説明する。

3.2.2 座標系と鏡面座標の初期値

この鏡面設計法によれば、主反射鏡の形状および初期値として与える副反射鏡の形状は任意でよいが、ここでは、鏡面製作上の経済性を考慮して両者共、回転二次曲面鏡とする。

図 3.1 において、副反射鏡上の任意の点 R を、2.2 節に示したと同様に、点 O に固定した直交単位ベクトル系 i_1, j_1, k_1 より定義される極座標 r_0, θ_1, ϕ_1 を用いて、次のように表す。

$$\overrightarrow{OR} = r_0(\theta_1, \phi_1)e, \quad (3.1)$$

$$e_r = \sin \theta_1 (\cos \phi_1 i_1 + \sin \phi_1 j_1) + \cos \theta_1 k_1 \quad (3.2)$$

ここで $r_0(\theta_1, \phi_1)$ は、点 O, F を焦点とする回転二次曲面鏡を表している。同様に、主反射鏡上の任意の点 M を、点 F に固定した直交単位ベクトル系 i_2, j_2, k_2 より定義される極座標

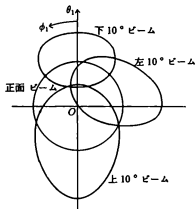


図 3.2: 副反射鏡の利用領域

r_p , θ_2 , ϕ_2 を用いて, 次のように表す.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{OM} &= \overrightarrow{OF} + r_p(\theta_2, \phi_2)\mathbf{e}_p \\ &= r_m(\theta_2, \phi_2)\end{aligned}\tag{3.3}$$

$$\mathbf{e}_p = \sin \theta_2 (\cos \phi_2 \mathbf{i}_2 + \sin \phi_2 \mathbf{j}_2) + \cos \theta_2 \mathbf{k}_2\tag{3.4}$$

ここで, $r_p(\theta_2, \phi_2)$ は, 点 F を焦点としベクトル \mathbf{k} を鏡軸とする回転放物面鏡を表している.

このとき, ビーム偏向方向にかかわらず, 主反射鏡の同一部分を用いるものとする, 副反射鏡の利用部分はビーム偏向方向によって異なり, θ_1 , ϕ_1 座標で示すと, グレゴリアン形式の場合, 図 3.2 のようになる. ここで, ビーム偏向のない場合には, \mathbf{k}_1 を適当に選ぶことにより, $\theta_1 = 0$ を中心とし, 半径 θ_0 の円となる.

の法則より, 図 3.3 の e_2 は

$$e_2 = k_R - 2(k_R \cdot n_m)n_m \quad (3.8)$$

となる。このとき, 平面波面に直交するすべての光線が副反射鏡で反射後, 点 O' に集束するような理想的な副反射鏡を考え, その上の点 R' を

$$\overrightarrow{O'R'} = l_1 e_1 \quad (3.9)$$

$$\overrightarrow{R'M} = l_2 e_2 \quad (3.10)$$

と表すと,

$$r_m = s + l_1 e_1 + l_2 e_2 \quad (3.11)$$

となり, また, 光路長一定の条件により次式が成り立つ。

$$l_1 + l_2 - (r_m - s) \cdot k_R = c \quad (\text{定数}) \quad (3.12)$$

式 (3.11), (3.12) より, l_1, e_1 を消去すると, l_2 は次のようになる。

$$l_2 = \frac{(c + r'_m \cdot k_R)^2 - r'_m \cdot r'_m}{2(c + r'_m \cdot k_R - r'_m \cdot e_2)} \quad (3.13)$$

$$r'_m = r_m - s \quad (3.14)$$

以上より, 点 R' は次のように決定される。

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OR'} &= r' e_r \\ &= r_m - l_2 e_2 \end{aligned} \quad (3.15)$$

また, 式 (3.15) より e_r すなわち θ_1, ϕ_1 が決まるから, 式 (3.1) より点 O から実際の鏡面上の点 R までの距離 r が計算される。従って, N_b 本のビームに対する $(r - r')^2$ の値が小さくなるよう, 次に加えるべき修正関数を決めることになる。

なお, ここで求めた点 R, R' を用いると, 開口上の取差 Δl は, 近似的に次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta l &\simeq e_1 \cdot (r - r') e_r - e_2 \cdot (r - r') e_r \\ &= 2(r - r')(e_1 \cdot n_s)(e_r \cdot n_s) \end{aligned} \quad (3.16)$$

ここで n_s は点 R における単位法線ベクトルである。

3.2.4 修整関数のパラメータと最適値の決定法

修整に用いる関数 $f(\theta_1, \phi_1)$ として、次のものを選ぶ。

$$f = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a_{mn} f_{mn}(\theta_1, \phi_1) \quad (3.17)$$

$$f_{mn} = \begin{cases} t_s^{2+n} \cos m\phi_1 & (\theta_1 \geq \theta_L) \\ 0 & (\theta_1 < \theta_L) \end{cases} \quad (3.18)$$

$$t_s = \frac{\theta_1}{\theta_0} - \frac{\theta_L}{\theta_0} \quad (3.19)$$

この関数は、 $\theta_1 = \theta_L$ で定義される副反射鏡の境界の内側は修整せず外側のみを修整するものであり、例えば $\theta_L \geq \theta_0$ (図 3.2 参照) と選べば、ビーム偏向のない場合の性能を損うことなく修整することができる。また、この関数は、 $\theta_1 = \theta_L$ において、

$$f|_{\theta_1=\theta_L} = \frac{\partial f}{\partial \theta_1} \Big|_{\theta_1=\theta_L} = \frac{\partial^2 f}{\partial \theta_1^2} \Big|_{\theta_1=\theta_L} = 0 \quad (3.20)$$

であるから、鏡面、法線方向、鏡面の曲率はすべて連続になっている。

係数 a_{mn} は、 N_s 個の方向のビームに対して最適な鏡面を与えるよう決めるものとする。まず、各ビーム方向において、それぞれ N_c 個の θ_2, ϕ_2 に対応する

$$\Delta r = r - r' \quad (3.21)$$

および θ_1, ϕ_1 の値を式 (3.16) を用いて計算する。この Δr は θ_1, ϕ_1 で定義される副反射鏡の形状に対する理想鏡面と実際の鏡面との差であるから、すべての Δr が 0 に近づくように係数 a_{mn} を決めればよい。ここで、修整後、更に一次放射器の設定をしないことにより、一次の収差を補正できることを考慮し、 a_{mn} を次の評価関数 H を最小とするよう、最小二乗法によって決定する。

$$H = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_c} \{ \Delta r_{ij} - (c_{0i} + c_{1i}\theta_{1ij} \cos \phi_{1ij} + c_{2i}\theta_{1ij} \sin \phi_{1ij}) - \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a_{mn} f_{mn}(\theta_{1ij}, \phi_{1ij}) \}^2 \quad (3.22)$$

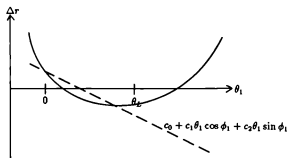
ここで c_{0i}, c_{1i}, c_{2i} は、各ビーム方向に対応した一次の項の定数であり、最小二乗法により、 a_{mn} と同時に決定される。

この修整関数による効果を図 3.4 を用いて説明する。修整前の Δr が図 3.4(a) に示すような形であったとする。これを修整したときに残留する Δr は、

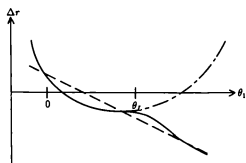
1. 修整は $\theta_1 \geq \theta_L$ の範囲に施す。

2. $c_0 + c_1 \theta_1 \cos \phi_1 + c_2 \theta_1 \sin \phi_1$ で定義される一次の項は修整によっては補正しない。

とすることにより、図 3.4(b) のようになる。次に、一次放射器の位置を新鏡面に対して最適な位置に設定しなおすと、図 3.4(b) の一次の項が補正され、結局、図 3.4(c) のようになる。図 3.4(a) と図 3.4(c) とを比較すると、この修整により Δr が大幅に減少することがわかる。



(a) 鏡面修整前の Δr



(b) 鏡面修整後の Δr



(c) 一次放射器位置再設定後の Δr

図 3.4: 鏡面修整の効果

3.3 設計例

ここでは、3.2節で示した設計法を用いた鏡面設計例を示し、そのビーム偏向特性について述べる。鏡面の形状は式(3.22)に示した H 、すなわち、収差を最小としよう決定するが、以下では、収差が最も大きく寄与するアンテナ性能の劣化である利得低下について検討するものとする。

3.3.1 一次元的なビーム配列をもつマルチビームアンテナ

前節に示した鏡面決定法を、一次元的なビーム配列をもつマルチビームアンテナに適用した結果を示す。修整前のオフセットグレゴリアンアンテナの形状を図3.5に示す。アンテナの開口径は120波長で θ_0 は 15° であり、鏡面系は交差偏波除去条件を満足している。このアンテナに3.2に示した手法を適用し、ビーム偏向特性を計算した。ビーム偏向方向を表わす座標系は、図3.6に示すように、 AZ 軸を EL 方向に $+2^\circ$ オフセットしている。修整関数はビーム偏向のない場合の性能劣化がなく、かつ、最も大きな修整効果を有するよう $\theta_L = 15^\circ$ とし、 $\xi_a = 8^\circ$ 、 $\xi_b = -12^\circ$ の方向に対して最適となるよう係数 a_{mn} を決めている。なお、一次放射器にはコルゲート円錐ホーンを用いており、一次放射器からの交差偏波の発生はないものとしている。また、副反射鏡でのエッジレベルは-10 dBである。ビーム偏向による利得の変化を計算した結果を図3.7に示す。図には比較のため、鏡面修整しない場合の計算結果をも示している。なお、計算は図3.6における $\eta_0 = 0^\circ$ 面内のビーム偏向に対して行っている。また、図3.8にビーム偏向による交差偏波特性を示す。

図3.7、3.8より次のことがわかる。

- 鏡面修整により、目的とする $\xi_a = 8^\circ$ 、 $\xi_b = -12^\circ$ 方向で、それぞれ、1 dB程度利得が高くなっており、また、これ以外の方向でも利得が上がっている。
- 交差偏波レベルに関しては、鏡面修整による影響はほとんど見られない。

以上のように、この鏡面修整法によると、正面方向の特性を変えることなく、ビーム偏向時の収差を小さくすることができる。

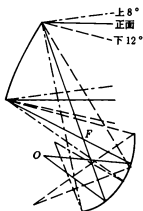


図 3.5: オフセットグレゴリアンアンテナの形状

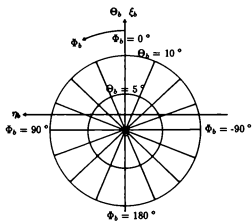


図 3.6: ビーム偏向方向を表わす座標系

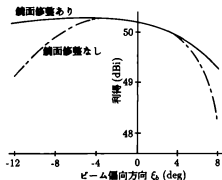


図 3.7: 鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向による利得の変化 (EL ビーム偏向時)

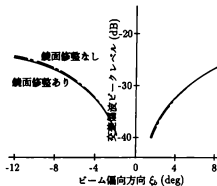


図 3.8: 鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 (EL ビーム偏向時)

3.3.2 二次元的なビーム配列をもつマルチビームアンテナ

この鏡面修整法を、二次元的なビーム配列をもつマルチビームアンテナに適用した結果を示す。修整前のオフセットグレゴリアンアンテナの形状を図3.9に示す。この鏡面は交差偏波消去条件を満足しており、開口径が120波長で、 $\theta_0 = 25^\circ$ にすることにより図3.5に示した鏡面よりコンパクトな構成になっている。しかしながら、式(2.18)より明らかなように、 θ_0 を大きくしたことによって等価パラボラの f_c/D_p の値は小さくなっており、ビーム偏向特性は劣っている。

ビーム偏向する範囲としては、半径 10° の円内とする。ただし、 EL 方向のビーム偏向特性の非対称性を考慮して図3.6に示すように、 AZ 軸を EL 方向に $+2^\circ$ オフセットしている。このアンテナに、 $\Theta_0 = 10^\circ$ の円内でのビーム偏向特性を改善すべく、目的とするビーム偏向方向として、表3.1に示すような、4方向、6方向、8方向、16方向について、それぞれ本鏡面修整法を適用した。図3.10に、 $\Theta_0 = 10^\circ$ の円上での利得を計算した結果を示す。修整関数は、ビーム偏向のない場合の性能劣化がなく、かつ、最も大きな修整効果を有するよう θ_L は 25° としている。なお、一次放射器としては、エッジレベル-10 dBのコルゲート円錐ホーンを仮定している。また、図3.10には参考のため、6方向を考慮した場合の $\Theta_0 = 5^\circ$ の円上での利得をも示している。また、図3.11に6方向を考慮した場合の交差偏波レベルを示している。

図3.10、3.11より次のことがわかる。

1. 目的とするビーム方向を4方向、6方向と増していくにつれて、その方向での利得が上がり、修整の効果が顕著に表れている。
2. 一方、6方向から増していても大きな効果はなく、従って、二次元的なビーム偏位に対しては、6方向を考慮すれば十分と言える。
3. この鏡面修整により、利得の最悪値で約3.2 dB改善されており、修整法の有効性を裏付けている。
4. 交差偏波レベルは $\Theta_0 = 10^\circ$ の円上ではほぼ等しく $-20 \sim -22$ dBであり、鏡面修整前後でほとんど変化がない。

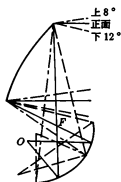
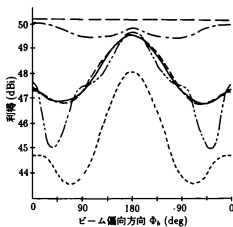


図 3.9: オフセットグレゴリアンアンテナの形状

表 3.1: 目的とするビーム偏向方向

Beam Direction (deg)			N_b			
Φ_b	AZ	EL	4	6	8	16
0.0	0.00	8.00	○	○	○	○
22.5	3.83	7.24				○
45.0	7.07	5.07		○	○	○
67.5	9.24	1.83				○
90.0	10.00	-2.00	○	○	○	○
112.5	9.24	-5.83				○
135.0	7.07	-9.07			○	○
157.5	3.83	-11.24				○
180.0	0.00	-12.00	○	○	○	○
-157.5	-3.83	-11.24				○
-135.0	-7.07	-9.07			○	○
-112.5	-9.24	-5.33				○
-90.0	-10.00	-2.00	○	○	○	○
-67.5	-9.24	1.33				○
-45.0	-7.07	5.07		○	○	○
-22.5	-3.83	7.24				○



- $\Theta_b = 0^\circ$
- - - $\Theta_b = 10^\circ$ (鏡面修整無し)
- · - $\Theta_b = 10^\circ$ (4方向鏡面修整)
- · — $\Theta_b = 10^\circ$ (6方向鏡面修整)
- - - - $\Theta_b = 10^\circ$ (8, 12方向鏡面修整)
- · - · - $\Theta_b = 5^\circ$ (6方向鏡面修整)

図 3.10: 鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向による利得の変化 (二次元ビーム偏向時)

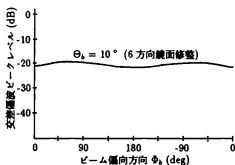


図 3.11: 鏡面修整オフセットグレゴリアンアンテナのビーム偏向による交差側波レベルの変化 (二次元ビーム偏向時)

3.4 修整関数の項数と修整のくり返し回数

式 (3.17) に示した修整関数において、 M, N は多く取れば取るほど、サンプリング点における Δr を小さくできる。しかしながら、サンプリング点数 N_c に対して M, N が大きすぎると、鏡面に凹凸を生じ、その結果、サンプリング点以外の点での Δr が大きくなるという現象を生ずることがある。従って、サンプリング点数 N_c は、このような現象がおこらない程度に十分大きくとる必要がある。また M, N について検討した結果 $M = 4, N = 1$ で、利得に 0.1 dB 程度で収束することが確認された。この鏡面設計法では、鏡面修整と一次放射器位置の設定とをくり返すことによって、目的とする複数個のビームに対する開口面上の収差を最小にする鏡面へと収束させる。このくり返し回数と収束の状態について検討した。図 3.12に、目的とするビーム方向が 1 個の場合と 4 個の場合とにおけるくり返し回数に対する利得の変化を示す。いずれの場合も、利得 0.1 dB 程度で収束させるには、くり返し回数は 5 回で十分である。

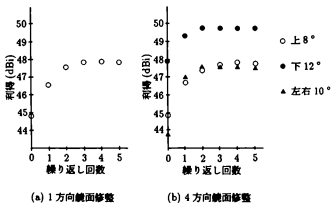


図 3.12: 繰り返し回数による利得の変化

3.5 結言

主反射鏡の形状をオフセットパラボラに選び、目的とする複数のビーム方向での取差を最小とするよう、一次放射器の位置と副反射鏡の形状を決定する手法を示した。この鏡面設計法によれば、主反射鏡の形状を与えれば、目的とする複数の方向での取差を最小にするような副反射鏡の形状および一次放射器の位置が決定できる。また、ここに示した修整関数を用いれば、ビーム偏向のない場合の特性を変えることなく、ビーム偏向時の特性を改善することが可能である。

この鏡面修整法を *OG* アンテナに適用し、数値計算によりその有効性を確認した。その結果、設計したアンテナのビーム偏向時における取差による利得低下は最悪値で 6.5 dB から 3.3 dB へと改善できることを明らかにした。ただし、交差偏波レベルの最悪値は約 20 dB で鏡面修整を施す前とはほとんど変わらない。なお、与える主反射鏡としては回転放物面鏡を選んだが、この手法ではこれに限らず、主反射鏡の形状は任意に与えることができる。

第 4 章

フロントフィードオフセットカセグレン形式マルチビームアンテナ

4.1 序言

通常のオフセットカセグレン形式やオフセットグレゴリアン形式のような回転二次曲面鏡よりなるオフセット複反射鏡アンテナをビーム偏向角度が大きい範囲まで用いる場合には、収差による利得低下が大きい、副反射鏡の大きさが主反射鏡の大きさに比べて大きくなるなどの問題がある [63]。また、これらを鏡面修整することにより収差による利得低下は改善できるが、交差偏波レベルは鏡面修整を施す前とほとんど変わらない [66]。

本章では、収差による利得低下が小さく、また、ビーム偏向時の交差偏波レベルの低いアンテナ構成形式として考案した [68, 69, 70, 71] フロントフィードオフセットカセグレン (FFOC) アンテナのビーム偏向特性について検討する [72, 73, 74, 75, 76, 63]。このアンテナは、従来のオフセット複反射鏡アンテナと同様に 2 枚の回転二次曲面鏡で構成されるが、一次放射器が主反射鏡からのビームが放射される側に配置されることが特徴である。本章ではまず、第 2 章に示した従来のオフセット複反射鏡アンテナの場合と同様、自由度のある 6 個の鏡面設計パラメータを交差偏波消去条件、ブロッキングを避ける条件等を用いて 2 個に減じ、これらの設計パラメータと実現できる鏡面構成およびそのビーム偏向特性との関係を示す。次に、衛星搭載用であることを考慮して設計パラメータを選定し、数値計算および試作モデルアンテナによる測定により、その優れたビーム偏向特性を確認する。

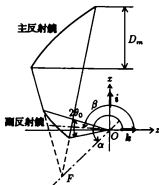


図 4.1: 鏡面設計パラメータ

4.2 鏡面系の設計パラメータと座標系

回転二次曲面鏡よりなる *FFOC* アンテナは、図 4.1 に示すように、点 O 、 F を焦点とする回転双曲面鏡よりなる副反射鏡と、点 F を焦点、 z 方向を鏡軸とする回転放物面鏡よりなる主反射鏡および点 O に置かれた一次放射系とで構成される。*FFOC* 形式は、図 4.1 のように、一次放射系の位置 O が副反射鏡に対して主反射鏡からのビームが放射される側にあることを特徴としている。

4.3 マルチビームアンテナとしての設計パラメータの選定

FFOC アンテナの設計パラメータは、他の形式のアンテナと同様、2.2 節に示した 6 個である。これらのパラメータは 2.7 節や 2.8 節と同様、次の条件で決定する。

- 条件 (1), (2) および (3) は OC や OG の場合と同じとする。

FFOC 形式の場合、4 番目の条件として、次の条件を与える。

- 条件 (4) 主反射鏡と副反射鏡とが重なり合わないようクリアランス δ_2 を設ける。

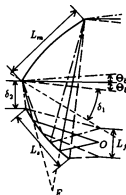


図 4.2: FFOC 形式マルチビームアンテナのパラメータ

従って、残る自由度のあるパラメータは二つとなり、これを *OC* 形式、*OG* 形式と同様に θ_0 と α とに選ぶものとする。

4.4 鏡面構成例とそのビーム偏向特性

δ_1 を 5° 、 δ_2 を 1λ として、自由度のある二つの設計パラメータ θ_0 、 α を変化した場合の鏡面構成を図 4.3~4.6 に示す。図より、*FFOC* 形式にすれば、実用的な鏡面系を得ることができる。また、*FFOC* 形式では一次放射器設定位置がビーム偏向方向にかかわらずほぼ同一平面上にあるため平面状に配列することが可能であり、一次放射系を含めたアンテナの構成が簡潔になることがわかる。

図 4.2 に示すように一次放射系、副反射鏡および主反射鏡の大きさ L_f 、 L_s 、 L_m を定義し、図 4.3~4.6 よりこれらを求めた結果を図 4.7 に示す。図 4.7 の結果より次のことがわかる。

- θ_0 を小さく選ぶ程、等価パラボラの f_e/D_p は大きくなるが、主反射鏡および副反射鏡は大きくなる。
- α は、小さく選ぶ程、副反射鏡の大きさを小さくできるが、主反射鏡が水平に近くなるために大きくなる性質がある。

- θ_0 を 25° 以上にすると、一次放射器が副反射鏡から主反射鏡に向かう光線のブロッキングとなるため、 θ_0 はこれより小さく選ぶ必要がある。
- 副反射鏡の大きさ L_s を主反射鏡開口径 D_m 以下にはできない。そこで、FFOC 形式においては、4.5節に示す理由で、 L_s の実用上の許容範囲を主反射鏡の大きさ L_m 以下とする。このとき、 $\theta = 10^\circ$ の場合は $\alpha < -130^\circ$ 、 $\theta = 15^\circ$ の場合は $\alpha < -125^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ の場合は $\alpha < -120^\circ$ が許容範囲となる。

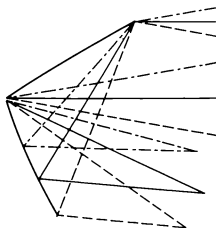
図 4.3~4.6 に示した鏡面系を、エッジレベル -10 dB のコルゲート円錐ホーンで給電した場合のビーム偏向時の放射特性計算値を示す。ビーム偏向方向は、OC 形式の場合と同様、図 2.12 において、 $\phi_b = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の面に対して、 θ_b を 10° まで変化させている。図 4.8~4.11 にビーム偏向による利得の変化、図 4.12~4.15 に同じく交差偏波レベルピーク値の変化を示す。なお、交差偏波のピーク方向は、ビームを $\phi_b = 0^\circ, 180^\circ$ に偏向した場合は AZ 方向に、 $\phi_b = 90^\circ, 270^\circ$ 方向に偏向した場合は EL 方向にあらわれ、図にはこの値を示している。いずれの鏡面系も交差偏波消去条件を満足しているため、ビーム偏向の無い場合には交差偏波は発生しないはずであるが、ビームを $\phi_b = 0^\circ, 180^\circ$ に偏向した場合、AZ 方向に交差偏波が見られる。

図 4.8~4.15 より次のことがわかる。

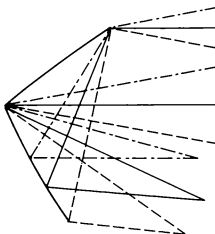
- θ_0 を小さく選ぶ程、ビーム偏向による利得低下や交差偏波レベルの上昇が小さい。これは、等価パラボラによる推定結果と一致する。
- θ_0 が同じ場合、 α を大きく選ぶ程、ビーム偏向による利得低下や交差偏波レベルの上昇が小さい。 θ_0 が同じということは等価パラボラも同じということであるが、ビーム偏向特性は微妙に異なる。ただし、その差は、 θ_0 が異なることによる差よりは小さい。
- ビームを上方向に偏向した場合の利得低下は下方向に偏向した場合に比べてかなり大きい。その主な原因は、ビームを上方向に偏向する場合にはアンテナ開口径が小さく見え、逆に、下方向に偏向する場合には大きく見えるためである。開口面積による利得の変化は ± 0.5 dB~1.2 dB であり、このことを考慮すると収差による利得低下は OG 形

式の場合と異なり、ビームを上方向に偏向した場合の方が下方向に偏向した場合よりも小さいと言える。

- 先に示した許容範囲では、ビーム偏向による利得低下は 1.8 dB、交差偏波レベルは -40 dB 程度が限度である。

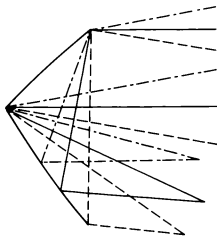


(a) $\alpha = -135^\circ$

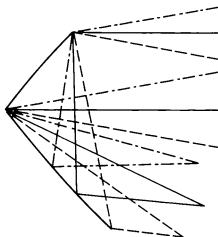


(b) $\alpha = -130^\circ$

図 4.3: FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 10^\circ$ (1/2)

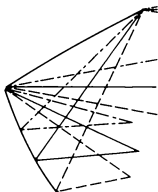


(c) $\alpha = -125^\circ$

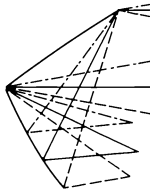


(d) $\alpha = -120^\circ$

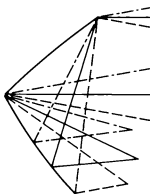
図 4.3: FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 10^\circ$ (2/2)



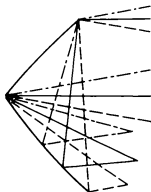
(a) $\alpha = -135^\circ$



(b) $\alpha = -130^\circ$

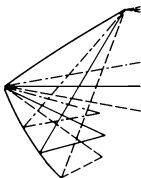


(c) $\alpha = -125^\circ$

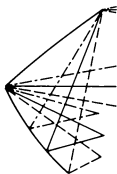


(d) $\alpha = -120^\circ$

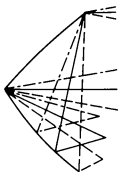
図 4.4: FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 15^\circ$



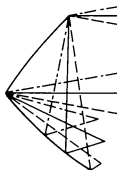
(a) $\alpha = -130^\circ$



(b) $\alpha = -125^\circ$

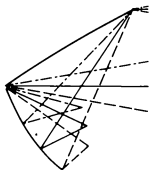


(c) $\alpha = -120^\circ$

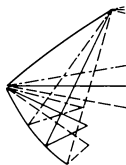


(d) $\alpha = -115^\circ$

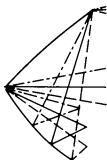
図 4.5: *FFOC* 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 20^\circ$



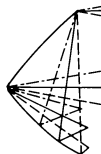
(a) $\alpha = -130^\circ$



(b) $\alpha = -125^\circ$



(c) $\alpha = -120^\circ$



(d) $\alpha = -115^\circ$

図 4.6: FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 $\theta_0 = 25^\circ$

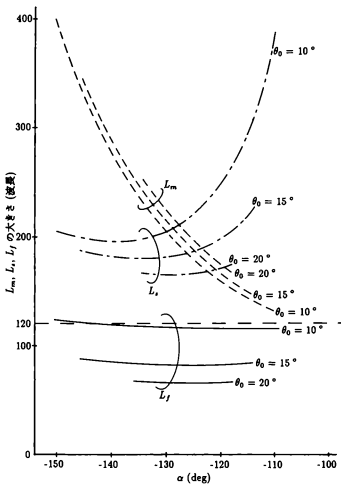
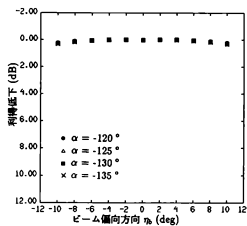
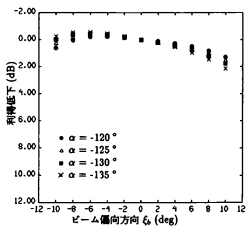


図 4.7: FFOC 形式マルチビームアンテナにおける一次放射器と副反射鏡の大きさ

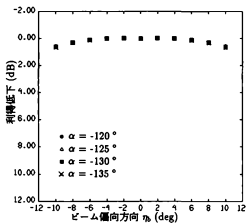


(a) AZ 方向ビーム偏向

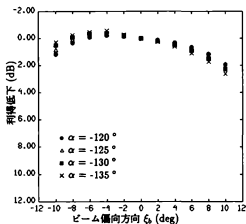


(b) EL 方向ビーム偏向

図 4.8: $FFOC$ アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 10^\circ$

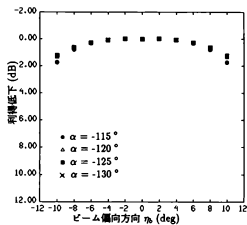


(a) AZ 方向ビーム偏向

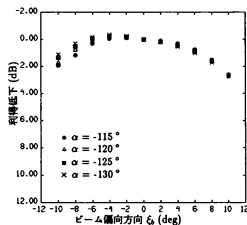


(b) EL 方向ビーム偏向

図 4.9: FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 15^\circ$

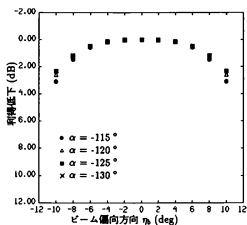


(a) AZ 方向ビーム偏向

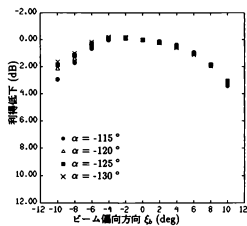


(b) EL 方向ビーム偏向

図 4.10: FOC アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 20^\circ$

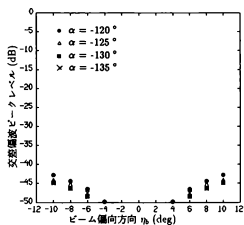


(a) AZ 方向ビーム偏向

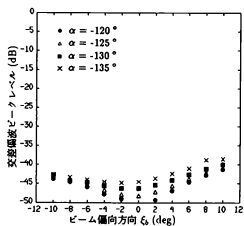


(b) EL 方向ビーム偏向

図 4.11: FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化 $\theta_0 = 25^\circ$

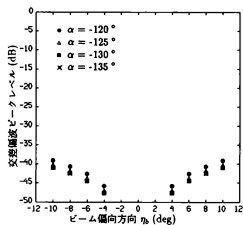


(a) AZ 方向ビーム偏向

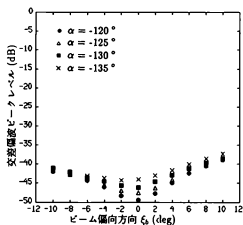


(b) EL 方向ビーム偏向

図 4.12: FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 10^\circ$

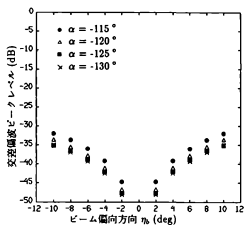


(a) AZ 方向ビーム偏向

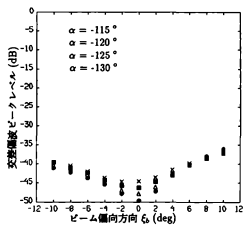


(b) EL 方向ビーム偏向

図 4.13: FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 15^\circ$

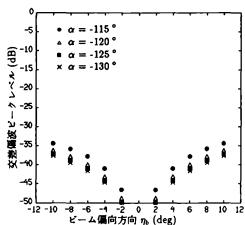


(a) AZ 方向ビーム偏向

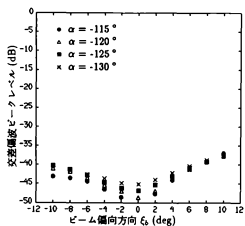


(b) EL 方向ビーム偏向

図 4.14: $FFOC$ アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 20^\circ$



(a) AZ 方向ビーム偏向



(b) EL 方向ビーム偏向

図 4.15: FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化 $\theta_0 = 25^\circ$

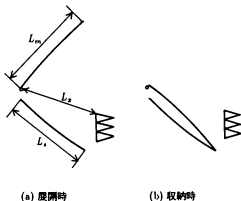


図 4.16: 衛星搭載用 FFOC 形式マルチビームアンテナ

4.5 衛星搭載用 FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例

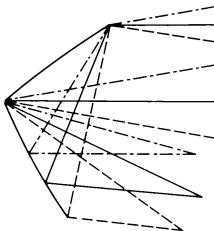
衛星搭載用 FFOC アンテナでは、図 4.16 のように、主反射鏡の下端を回転中心として主反射鏡を副反射鏡の方へ回転できるようにすれば、ロケット内にコンパクトに収納できる。このことを考慮して次の条件を設けるものとする。

- 条件 (5) ロケット打ち上げの際の耐振動性を良くし、かつ、鏡面製作上のコストを低減するために、主反射鏡の大きさ L_m と副反射鏡の大きさ L_s とを等しくするようパラメータ α を決める。
- 条件 (6) 主反射鏡を副反射鏡の方へ回転する際、主反射鏡が一次放射器にぶつからないよう

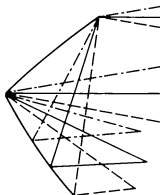
$$L_s > L_s = L_m \quad (4.1)$$

の範囲内で、鏡面の大きさを最小とするようパラメータ θ_0 を決める。

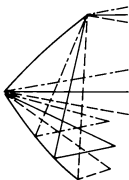
条件 (5) を満足する鏡面構成を図 4.17 に示す。また、これより、 $L_s (= L_m)$ と L_s 、 L_f を計算した結果を図 4.18 に示す。これより、条件 (6) を満足するものとして $\theta_0 = 16^\circ$ の鏡面系を選ぶ。



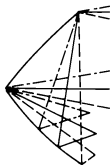
(a) $\theta_0 = 10^\circ$



(b) $\theta_0 = 14^\circ$



(c) $\theta_0 = 18^\circ$



(d) $\theta_0 = 22^\circ$

図 4.17: FFOC 形式マルチビームアンテナの設計例 ($L_s = L_m$)

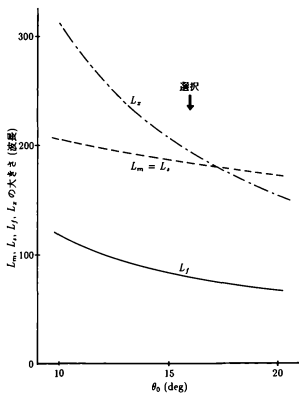


図 4.18: FFOC 形式マルチビームアンテナにおける一次放射器と副反射鏡の大きさ ($L_s = L_m$)

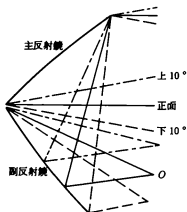


図 4.19: 衛星搭載用 FFOC アンテナの設計例

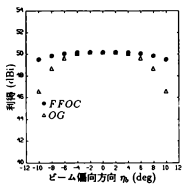
こうして決定した各設計パラメータは次のようになる。

$$\begin{aligned}
 D_m &= 120 \text{ 波長} \\
 2\theta_0 &= 16^\circ \\
 \alpha &= -123.61^\circ \\
 \beta &= 171.02^\circ \\
 e &= 2.049 \\
 a &= 88.81 \text{ 波長}
 \end{aligned}$$

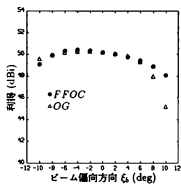
このパラメータによって決定されるアンテナの外形を図 4.19 に示す。図 4.19 に示した鏡面系をエッジレベル -10 dB のコルゲート円錐ホーンで給電した場合のビーム偏向特性を計算した。図 2.12 において、 $\phi_0 = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ の面に対して、 θ_0 を 10° までビーム偏向した場合と、視半径 10° ($\theta_0 = 10^\circ$) の円周上にビーム偏向した場合とについて計算している。図 4.20 にビーム偏向による利得の変化、図 4.21 には同じく交差偏波レベルピーク値の変化を示す。なお、図には比較のため、OG 形式についての計算値をも示している。計算に用いた OG アンテナは、等価的な f_s/D_p が図 4.19 に示した FFOC アンテナのものと等しくなるよう、 $\theta_0 = 16^\circ$ としている。

図 4.20, 4.21 より次のことがわかる。

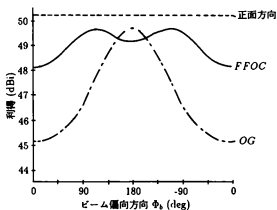
- 視半径 10° の円周上にビーム偏向した場合の *FFOC* アンテナによる最大利得低下は 2.1 dB であり、等価的な f_c/D_p の等しい *OG* アンテナの最大利得低下 5.0 dB に比べて、約 3 dB 優れている。
- 同じく、*FFOC* アンテナの交差偏波レベルは最大 -38.0 dB であり、*OG* アンテナの -22.4 dB に比べて、15 dB 以上優れている。



(a) AZ 方向ビーム偏向

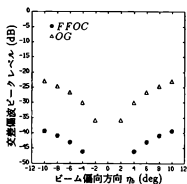


(b) EL 方向ビーム偏向

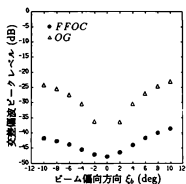


(c) $\Theta_b = 10^\circ$ 方向ビーム偏向

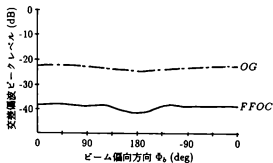
図 4.20: 衛星搭載用 FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化



(a) AZ 方向ビーム偏向



(b) EL 方向ビーム偏向



(c) $\Theta_b = 10^\circ$ 方向ビーム偏向

図 4.21: 衛星搭載用 FFOC アンテナのビーム偏向による交差偏波レベルの変化

4.6 試作アンテナの放射特性

4.5で設計した *F*FOC アンテナを 20 GHz 帯で用いるものとして開口径 1800 mm で試作した。試作アンテナの概略構成図を図 4.22 に示す。一次放射器は図 4.23 に示すような開口径 86 mm、長さ 210 mm のコルゲート円錐ホーンで、副反射鏡でのエッジレベルは -15 dB である。測定周波数は 20.1 GHz で、正面ビームにおいて利得は 50.1 dB、ビーム幅は 0.6° であった。ビーム偏向特性は、一次放射器の位置を図 4.22 に示す $x_{\text{h}}y_{\text{h}}$ 平面上で変化して測定した。図 4.24 に測定中の *F*FOC アンテナを示す。なお、アンテナは、図 4.22 に示した配置を 90° 回転して測定している。

ビームを上、下、左、右にそれぞれ 10° まで偏向した場合の利得低下を図 4.25 に示す。図において、●は測定値、破線は計算値を示している。図より、両者はよく一致していることがわかる。また、10° (約 17 ビーム幅) のビーム偏向時における利得低下は 1.8 dB 以内である。

図 4.26 に、ビームを上、下、右にそれぞれ 10° まで偏向した場合の放射パターン測定結果を示す。図において、実線は正偏波、破線は交差偏波の放射パターンを示している。交差偏波ピークレベルの最大値は -34 dB であり、一次放射器から発生する交差偏波成分が -40 dB であることを考慮すると、鏡面系から発生する交差偏波成分は非常に小さいことがわかる。通常、衛星搭載アンテナに要求される交差偏波レベルは -30 dB 程度であり、これを十分満足するものである。

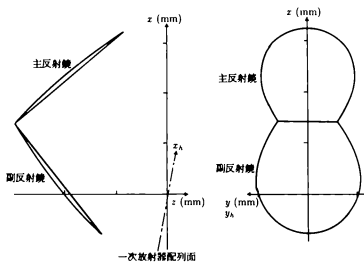


図 4.22: 試作 FFOC アンテナの概略構成

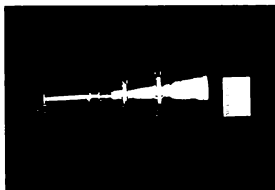


図 4.23: 試作したコルゲート円錐ホーン

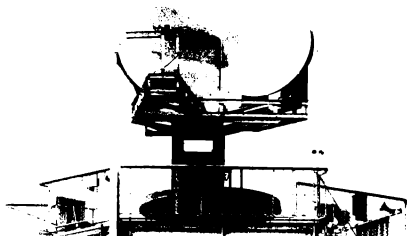


図 4.24: 測定中の試作 FFOC アンテナ

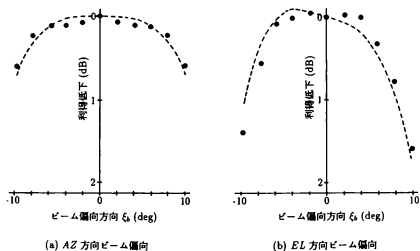
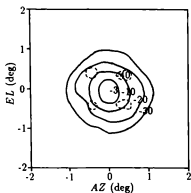
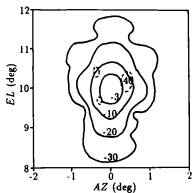


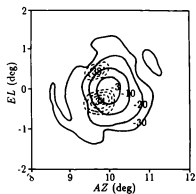
図 4.25: 試作 FFOC アンテナのビーム偏向による利得の変化測定結果



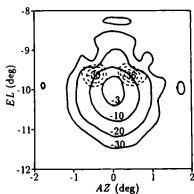
(a) 正面ビーム



(b) 上 10° ビーム



(c) 右 10° ビーム



(d) 下 10° ビーム

実線：正偏波パターン -3, -10, -20, -30 dB

破線：交差偏波パターン -34, -36, -38, -40 dB

図 4.26: 試作 FFOC アンテナのビーム偏向時の放射パターン測定結果

4.7 結言

フロントフィードオフセットカセグレン (*FFOC*) アンテナを考案し、その設計パラメータと実現できる鏡面構成、および、ビーム偏向特性との関係を示した。次に、衛星搭載用であることを考慮して設計パラメータを選定し、数値計算および試作モデルアンテナによる測定により、その優れたビーム偏向特性を確認した。その結果、設計したアンテナのビーム偏向時における収差による利得低下は最悪値で 2.0 dB、交差偏波レベルの最悪値は約 -38 dB であり、通常の衛星搭載アンテナに要求される性能を十分満足する。これらの検討結果より、*FFOC* 形式は、他の形式に比べて、ビーム偏向による性能劣化が少なく、コンパクトに設計できるため、国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナに適していることが明らかになった。

なお、本研究と相前後して、*Dragone* が、*FFOC* アンテナによって収差を小さくできることを、収差を解析することによって示している [77]。また、*Jorgensen* らは、*FFOC* アンテナおよび *FFOC* アンテナの変形であるサイドフィードオフセットカセグレン (*SFOC*) 形式のビーム偏向特性の一例を示している [78]。また、水口らは、*FFOC* アンテナは、鏡面修整によりさらに収差を小さくできることを示している [39, 40]。

第 5 章

フロントフィードオフセットカセグレン形式のアレー給電マルチ成形ビームアンテナ

5.1 序言

アレー給電反射鏡アンテナを用いたマルチ成形ビームアンテナにおいては、鏡面系の形式と大きさ、アレーを構成する素子アンテナの形状と配列、また、各素子アンテナの励振分布がその性能に大きく寄与する。

まず、鏡面系の形式に関しては、各素子アンテナが反射鏡の焦点より離れた位置に配置されるため、これにより生じる利得低下、サイドローブレベル上昇、交差偏波レベル上昇などの性能劣化の小さいことが要求される。これは、成形ビームは各素子アンテナによって放射されるコンポーネントビームの合成として実現されるものであるから、高利得、高ビーム間アイソレーションの成形ビームを得るには、個々のコンポーネントビームの性能を優れたものにする必要があるからである。また、反射鏡の大きさは、衛星搭載という目的を考慮すると小さい方が好ましいが、ビーム間アイソレーションを確保するためにはある程度の大きさが必要となり、適当な大きさが存在する。

つぎに、給電アレーに関しては、アレーを構成する素子アンテナの選択により配列が制限され、その結果、サービスエリア内利得、ビーム間アイソレーションなどの実現できる値が制約される。また、同一周波数、同一偏波の異なるビームが同一の素子アンテナを共用しないよう配列を決定する必要がある。

さらに、最終的に各ビームの放射特性を決定するのはアレー励振分布であり、所望のサービスエリア内利得とビーム間アイソレーションを満足するよう決定する必要がある。アレー

給電反射鏡アンテナにおけるアレー励振分布決定法としては、最小二乗法 [52, 58], 方向拘束付出力電力最小化法 [53], ミニマックス法 [54, 55, 56] などが知られている。これらはいずれも、アレー励振分布を徐々に更新することにより、各地球局方向への放射電力とあらかじめ与えておく放射電力目標値との差を何らかの意味において最小とするものである。なお、アレー励振分布の更新の手法としては、最急降下法、ニュートン法、共役勾配法、Powell 法などの非線形最適化手法 [57] が用いられる。これらのアレー励振分布決定法は、地球局の数が素子アンテナの数より多い場合に有効であり、例えば、サービスエリアが領域で与えられこれを多数の仮想地球局で代表させるような場合に有効である。一方、サービスエリアが固定の地球局で与えられた場合などのように素子アンテナの数が地球局の数より多い場合には、十分の自由度があるので、非線形最適化手法を用いるよりも効率のよいアレー励振分布決定法が考えられる。

本章では、ビーム間アイソレーションを所望の値とする条件のもとで、サービスエリア内の地球局方向への放射電力の最小値を最大とする給電アレーの設計法について述べ、これを *FFOC* アンテナの一次放射器として適用したマルチ成形ビームアンテナの設計例を示す。まず、給電アレーを構成する素子アンテナの形状と大きさに最適値があることを基本ビームモードを用いた簡易式と数値計算によって明らかにする [79]。次に、素子アンテナの配列法として、同一周波数、同一偏波の、異なるビームが同一の素子アンテナを共有しない条件で自動的に素子配列を決定するアルゴリズムを示す。さらに、給電アレーを構成する素子アンテナの数がサービスエリア内の地球局の数より多い場合において地球局方向への放射電力の最小値を最大とするアレー励振分布に対する必要条件を求め、この結果にもとづいた給電アレー励振分布決定アルゴリズムを示す [80, 81, 82]。これらを国際通信衛星搭載を想定したアレー給電 *FFOC* 形式マルチ成形ビームアンテナの一次放射器として適用し、数値計算および試作モデルアンテナによる測定により得られた結果を示す [83, 84]。



図 5.1: 想定したサービスエリア

5.2 想定したサービスエリア

図 5.1 にインテルサット大西洋衛星を想定して設定したサービスエリアを示す。ここでは、東経 335° の静止軌道上の衛星に搭載されたマルチビームにより、北アメリカおよびヨーロッパに計 10 本の成形ビームを照射するものとしている。これらのビームのうち、ビーム A, C, $F(= F' + F'')$, H, J は V 偏波、ビーム B, D, E, G, I は H 偏波とし、隣接するビーム間のアイソレーションは偏波を変えることにより確保するものとする。なお、すべてのビームは同一周波数で用いるものとする。また、それぞれのビームのサービスエリアは、そのビームで照射される地球局の位置で定義するものとする。表 5.1 に各ビームに含まれる地球局の位置を示す。地球局は計 45 個である。

表 5.1: サービスエリア内の地球局の位置

Beam	NO.	Name	Longitude	Latitude	AZ	EL
A	1	Atlanta	-83.363	33.750	-6.631	5.063
	2	Etam	-79.737	39.281	-5.893	5.798
	3	Lenox	-79.579	39.568	-5.858	5.834
C	4	New-Haven	-72.917	41.300	-5.361	6.106
D	5	Andover	-70.694	44.632	-4.807	6.490
	6	Mill-Village	-64.666	44.194	-4.370	6.508
	7	Des-Laurentides	-74.533	45.944	-4.950	6.594
E	8	Portcurno	-5.845	50.043	1.984	7.240
	9	Goonhilly	-5.175	50.049	2.031	7.238
	10	Madley	-2.837	52.029	2.159	7.400
	11	Pleumeur-Bodou	-3.522	48.794	2.257	7.114
F	12	Tanum	11.379	58.705	2.823	7.819
	13	Rurum	6.214	53.285	2.874	7.449
	14	Lesave	5.147	50.130	3.005	7.183
	15	Berouay-En-Othe	3.884	48.221	3.016	7.014
	16	Uisingen	8.482	50.333	3.281	7.177
F'	17	Sekoula	-6.614	33.967	2.508	5.447
	18	Sintra	-9.260	38.669	2.001	6.078
	19	Buitrago	-3.612	41.007	2.613	6.301
	20	Robledo	-3.737	40.500	2.620	6.243
	21	Gibraltar	-5.304	36.126	2.597	5.720
G	22	Raisting	11.113	47.914	3.689	6.929
	23	Leuk	7.648	47.914	3.689	6.929
	24	Albenz	15.293	47.555	4.064	6.857
	25	Cheia	25.939	45.457	5.023	6.539
	26	Fucino	13.601	41.981	4.360	6.284
	27	Lario	9.409	46.158	3.621	5.820
	28	Palermo	13.333	38.000	4.621	5.820
	29	Lekharia	3.606	38.559	3.673	5.720
	30	Tuscia	10.000	38.000	4.414	5.600
	31	Jugoslavija	20.173	43.628	4.780	6.404
H	32	Thermopylae	22.687	38.824	5.376	5.829
	33	Ankara	32.807	39.841	5.981	6.818
I	34	Arranijeh	35.669	33.875	6.636	5.076
	35	Emeq-Ha'da	34.983	31.683	6.773	4.798
	36	Maadi	31.294	29.992	6.677	4.608
	37	Asadabad	48.108	34.756	7.030	5.051
	38	Dujail	35.839	32.086	6.788	4.842
	39	Bagd	35.839	32.086	6.788	4.842
	40	Umm-Al-Aish	47.789	29.680	7.434	4.399
J	41	Ras-Abu-Jasjur	50.611	28.069	7.754	3.881
	42	Doha	51.226	25.127	7.826	3.745
	43	Riyadh	48.517	24.419	7.789	3.689
	44	Taif	40.514	21.226	7.743	3.282
	45	Aru-Dhabi	54.184	24.121	7.926	3.579

5.3 鏡面系の選定

アレーで給電された反射鏡アンテナから放射される成形ビームは、各素子アンテナによって給電された反射鏡アンテナから放射されるコンポーネントビームの合成であるから、各コンポーネントビームが優れた性能をもつ必要がある。このために、鏡面系の形式は、焦点から離れた位置に素子アンテナを置いた場合に開口上に生じる収差が小さく、また、交差偏波成分の発生の小さいものを選択する必要がある。ここでは、この条件に適した鏡面系の形式として、第4章で検討したFFOC形式を選定した。

また、アンテナ開口径は、同一偏波で最も接近したビーム間で、コンポーネントビームの第1サイドローブが他方のビームの中にはいらないよう決定した。すなわち、ビームB、Dとの間が最も接近しており、そのビーム間隔が 1.2° 程度であることより、コンポーネントビームのビーム幅を 0.6° 程度とするよう開口径を120波長に選んだ。

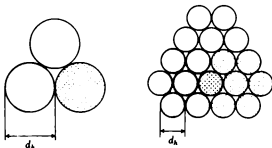
設計したFFOCアンテナの結元および外形は、4.5節に示したとおりである。

5.4 素子アンテナの選定

5.4.1 基本ビームモードによる簡易設計法

1本の成形ビームについて考えると、成形ビームは、放射方向の異なるペンシルビームを適当な振幅振幅位相で合成したものだと考えることができる。このペンシルビームを基本ビームとよぶことにする。この基本ビームには、利得が高く、かつ、サイドローブレベルが低いということと共に、隣接する基本ビーム間のクロスオーバーレベルが成形ビームを実現できるに足るだけ高い(通常-6 dB以上)ことが要求される。ここでは、図5.2に示すように、基本ビームを、それぞれの素子アンテナから放射される1本のコンポーネントビームで構成した場合と、7本のコンポーネントビームを合成して構成した場合において、基本ビームの利得とクロスオーバーレベルとについて、ビームモード[21, 22]の基本モードを用いて検討する。なお、図にはそれぞれ、3本の基本ビームを放射するのに必要な素子アンテナの配列を示しており、同じ模様で示した素子アンテナが1本の基本ビームを放射するのに必要な素子アンテナを表わしている。

反射鏡開口を含む平面上に $\exp(-\Omega^2 t^2)$ ($0 \leq t \leq \infty$)の回転対称な分布があり、そのう



(a) 1 ホーン構成

(b) 7 ホーン構成

図 5.2: 基本ビームを構成する素子アンテナ

ち $0 \leq t \leq 1$ の範囲に反射鏡開口があるとき、すなわちエッジレベルが $-8.69\Omega^2 (dB)$ のときの、開口能率 η_c は次式で表わされる。

$$\eta_c = \eta_{apil} \eta_{aper} \quad (5.1)$$

$$\eta_{apil} = \frac{\int_0^1 e^{-2\Omega^2 t^2} t dt}{\int_0^\infty e^{-2\Omega^2 t^2} t dt} \quad (5.2)$$

$$\eta_{aper} = \frac{\left| \int_0^1 e^{-\Omega^2 t^2} t dt \right|^2}{\int_0^1 e^{-2\Omega^2 t^2} t dt} \quad (5.3)$$

$$\frac{\left| \int_0^1 t dt \right|^2}{\int_0^1 t dt}$$

ここで、 η_{apil} 、 η_{aper} はそれぞれ、スビルオーバーによる能率、開口分布による能率を表わしている。開口能率 η_c は解析的に計算でき、次のようになる。

$$\eta_c = 3 + 20 \log \frac{1 - \exp(-\Omega^2)}{\Omega} \quad (dB) \quad (5.4)$$

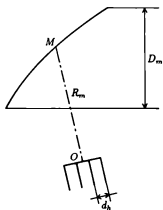
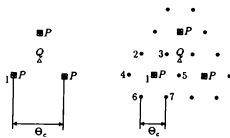


図 5.3: アレー給電オフセットパラボラアンテナのパラメータ



(a) 1 ホーン構成

(b) 7 ホーン構成

図 5.4: 基本ビームの構成

図 5.3 に示すようなオフセットパラボラを考える。図のように、オフセットパラボラの開口径を D_m 、オフセットパラボラの焦点 O と開口中心の点 M との距離を R_m とし、素子アンテナが開口径 d_h 、ホーン長無限大の円錐ホーンであるとする、 Ω は次のように表わされる。

$$\Omega = \frac{\pi}{4\Omega_0} \frac{D_m d_h}{R_m \lambda} \quad \Omega_0 = \begin{pmatrix} 1.3018 & : TE_{11} \text{ mode 励振} \\ 1.5539 & : EH_{11} \text{ mode 励振} \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

なお、 Ω_0 の値は、基本ビームモードが最大となるように決めている。このとき、図 5.2 に示すように素子アンテナを配列したときの、各素子アンテナによるコンポーネントビームの放射方向は図 5.4 のようになる。図において、 \bullet がコンポーネントビームの放射方向、 \square が基本ビームの放射方向 P 、 \triangle が 3 つの基本ビームによる放射レベルが等しくなる方向 Q を示しており、これらの方向での放射レベルが問題となる。なお、 Θ_c は、コンポーネントビームのビーム間隔を表わしている。

ここで、各素子アンテナによる放射パターン $g_c(\theta)$ (dB) を次のように近似する。

$$g_c(\theta) \approx -12 \left(\frac{\theta}{\Theta_3} \right)^2 \quad (dB) \quad (5.6)$$

Θ_3 はビーム幅であり、次式で近似する。

$$\Theta_3 \approx \frac{\lambda}{D_m} \quad (rad) \quad (5.7)$$

また、 Θ_c を

$$\Theta_c \approx \frac{d_h}{R_m} \quad (rad) \quad (5.8)$$

と近似すると、式 (5.6) は次のようになる。

$$\begin{aligned} g_c(\theta) &\approx -12 \left(\frac{\alpha \Theta_c}{\Theta_3} \right)^2 \\ &= -12 \left(\frac{4\Omega_0}{\pi} \right)^2 \alpha^2 \Omega^2 \quad (dB) \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\alpha = \frac{\theta}{\Theta_c} \quad (5.10)$$

ここで、 α は放射方向 θ を Θ_c で規格化した値である。これより、点 P, Q におけるアンテナ

表 5.2: α_j の値 (1 ホーンの場合)

j	点 P	点 Q
1	0.000	0.577

表 5.3: α_j の値 (7 ホーンの場合)

j	点 P	点 Q
1	0.000	1.155
2	1.000	1.528
3	1.000	0.577
4	1.000	2.082
5	1.000	0.577
6	1.000	2.082
7	1.000	1.528

能率 η_a は次のようになる。

$$\eta_a = \eta_c + 10 \log \frac{\left| \sum_{j=1}^N d_j h_j \right|^2}{\sum_{j=1}^N |d_j|^2} \quad (dB) \quad (5.11)$$

$$h_j = 10^{-\frac{12}{20} \left(\frac{4\Omega_0}{\pi} \right)^2 \alpha_j^2 \Omega^2} \quad (5.12)$$

ここで、 N は 1 本の基本ビームを構成する素子ホーンの数で、図 5.2K おいて (a) のとき 1, (b) のとき 7 である。 h_j は式 (5.9) で決まる j 番目の素子アンテナによる点 P または Q 方向への放射電界の真値、 α_j は、この j 番目の素子アンテナのコンポーネントビームの放射方向より幾何学的に決まる定数であり、図 5.4 より表 5.2, 5.3 のようになる。また、 d_j は、各素子ホーンの励振分布である。

Ω をパラメータとし、 N が 1 の場合と 7 の場合とについて、点 P, Q での能率 η_a を計算した結果をそれぞれ図 5.5, 5.6 に示す。励振分布 d_j は、一様分布の場合と、点 P での能率を最大にする分布とについて検討している。図より、次のことがわかる。

- 1 本のホーンで基本ビームを構成する場合には、 Ω を 1.12 程度 (エッジレベル 約 -10.9

dB) に選べば点 P における能率を -0.9 dB にできるが、このとき点 Q におけるレベルはこれより約 14 dB (TE_{11} mode) または約 20 dB (EH_{11} mode) 下がり、成形ビームを構成することはできない。また、 Ω を $0.54(TE_{11} \text{ mode})$, $0.46(EH_{11} \text{ mode})$ に選べば点 Q における能率を最大にできるが、この時の点 P における能率はそれぞれ -3.6 dB, -4.6 dB となる。

- 7本の通常円錐ホーン (TE_{11} mode) で基本ビームを構成する場合には、 Ω を 0.38 (一様分布の場合、各ホーンのエッジレベル 約 1.3 dB), 0.42 (点 P での能率を最大にする分布の場合、各ホーンのエッジレベル 約 1.5 dB) 程度に選べば点 P における能率をそれぞれ -1.5 dB, -1.2 dB にできる。また、このとき点 Q におけるクロスオーバーレベルはそれぞれ、これより約 3.8 dB, 4.7 dB 低くなり、成形ビームの構成に適している。なお、これらはいずれも、次に述べるコルゲート円錐ホーンの場合より優れている。
- 7本のコルゲート円錐ホーン (EH_{11} mode) で基本ビームを構成する場合には、 Ω を 0.32 (一様分布の場合、各ホーンのエッジレベル 約 0.9 dB), 0.38 (点 P での能率を最大にする分布の場合、各ホーンのエッジレベル 約 1.3 dB) 程度に選べば点 P における能率をそれぞれ -2.8 dB, -2.5 dB にできる。また、このとき点 Q におけるクロスオーバーレベルはそれぞれ、これより約 3.8 dB, 5.2 dB 低くなり、成形ビームの構成に適している。

ここで注目すべきことは、式 (5.11) の η_a が Ω のみの関数になる点である。 Ω は次のように書き直すことができる。

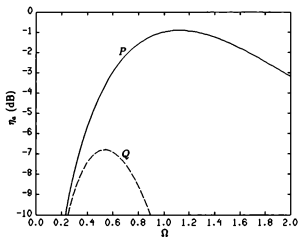
$$\begin{aligned}\Omega &= \frac{\pi}{4\Omega_0} \frac{D_m d_h}{R_m \lambda} \\ &= \frac{\pi}{4\Omega_0} \frac{D_m}{R_m} \cdot \frac{d_h}{\lambda} \\ &= \frac{\pi}{4\Omega_0} \frac{D_m}{\lambda} \cdot \Theta_c\end{aligned}\tag{5.13}$$

これは、 Ω を最適な値に決めておけば、反射鏡の形状 D_m/R_m に対して、素子アンテナの最適な開口径 d_h/λ が決定されることを意味している。例えば、図 4.19 に示した $FFOC$ アンテナ

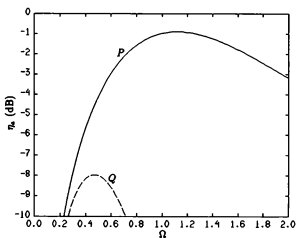
の場合、等価パラボラで考えると、

$$\frac{D_m}{R_m} = 4 \tan \frac{\theta_0}{2} = 0.56 \quad (5.14)$$

であり、7本の円錐ホーンを点 P での能率を最大にする分布で励振して基本ビームを構成する場合、円錐ホーンの開口径を 1.24λ ($TE_{11}mode$), 1.34λ ($EH_{11}mode$) にすれば、点 P での能率をそれぞれ、-1.2dB, -2.5dB にできると予想できる。また、式 (5.13) によれば、反射鏡の開口径 D_m/λ に対してコンポーネントビームのビーム間隔 Θ_c が決まるため、与えられたサービスエリアを覆うのに必要な素子アンテナの概略の数が分かることになる。例えば、120波長の開口径を有するアンテナでは、コンポーネントビームのビーム間隔 Θ_c は $0.33 \sim 0.36^\circ$ となり、視半径 10° のサービスエリア全体を隙間なくカバーしようとする、半径方向の素子アンテナの数は 28~30 本、全素子アンテナ数は 2500~2800 本必要となることがわかる。



(a) TE_{11} mode



(b) EH_{11} mode

図 5.5: 点 P , Q での能率 η_a (1 ホーン)

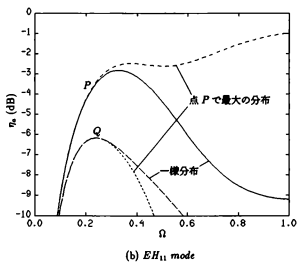
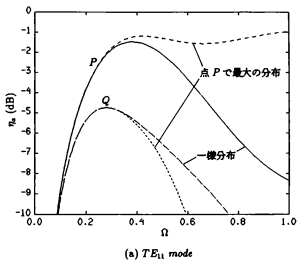
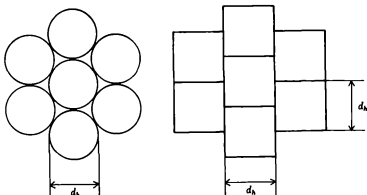


図 5.6: 点 P , Q での効率 η_s (7 ホーン)



(a) 円錐ホーンアレー

(b) 矩形ホーンアレー

図 5.7: 7 素子ホーンの配列

5.4.2 厳密解との比較

次の 3 種類のホーンを素子アンテナとする 7 素子アレーで図 4.19 に示した *FFOC* アンテナを給電した場合の放射特性を、開口径 d_h をパラメータにして計算した。

- 通常円錐ホーン ($TE_{11}mode$)
- コルゲート円錐ホーン ($EH_{11}mode$)
- 矩形ホーン

それぞれのホーンの配列を図 5.7 に示す。このホーンアレーは、中心のホーンの開口中心が焦点と一致するように配置する。また、ホーンを中心軸に沿う方向は、図 4.1 の β 方向と一致させる。コンポーネントビーム放射特性の計算はいずれも、2 章に示した幾何光学と電流分布法とを用いている。また、励振分布は利得が最大となるよう決めている。計算結果として、図 5.8 に、アンテナ利得を示す。また、図 5.11、5.9、5.10 に二次元放射パターンを示す。図には、ピークからそれぞれ 3dB、10dB、20dB、30dB 低いレベルの等高線を描いている。図より次のことがわかる。

- いずれのホーンでも $d_h = 1.25\lambda$ 付近のとき利得が最大となる。これは、前節の簡易式で求めた値とよく一致している。ただし、通常円錐ホーン、コルゲート円錐ホーンの場合の能率は、それぞれ、-2.5dB, -3.1dB であり、前節の簡易式で求めた値 -1.2dB, -2.5dB に比べて低くなっている。通常円錐ホーンの場合に特に差が大きいのは、通常円錐ホーンの放射パターンは本来は楕円ビームであるにもかかわらず、回転対称ビームで近似しているためである。
- 矩形ホーンの場合が最も利得が高く、コルゲート円錐ホーンの場合が最も低い。矩形ホーンの場合に円錐ホーンより利得が高いのは、隙間無くホーンを配列できることと、同じ開口径の円錐ホーンに比べてホーンの間隔を近付けることができるのでクロスオーバーレベルが高くなるためである。また、通常円錐ホーンの場合にコルゲート円錐ホーンより利得が高いのは、E面のビーム幅がしぼられ、反射鏡からのスビルオーバー損失が小さくなるためである。
- いずれのホーンでも $d_h = 1.0\lambda$ のときには、第2サイドローブが -30 dB 以上となる。また、矩形ホーンの場合、ホーン開口径 d_h を 1.25λ 以上 1.5λ 以下、円錐ホーンの場合、 d_h を 1.25λ 以上にすれば、半径 1.2° 以上の範囲に -30 dB 以上のサイドローブは現われない。

以上の結果より、素子アンテナとしては開口径 1.25λ の矩形ホーンを選定する。

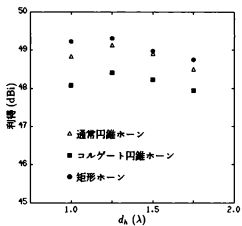
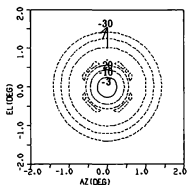
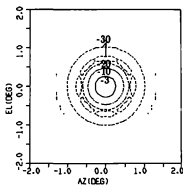


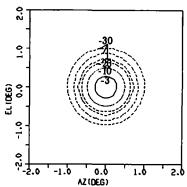
図 5.8: 7 素子ホーンアレー給電アンテナの利得



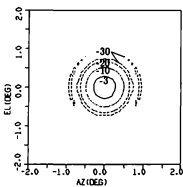
(a) $d_h = 1.0 \lambda$



(b) $d_h = 1.25 \lambda$

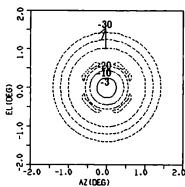


(c) $d_h = 1.5 \lambda$

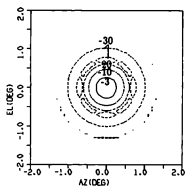


(d) $d_h = 1.75 \lambda$

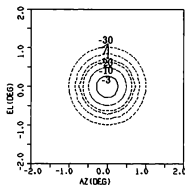
図 5.9: 7 素子ホーンアレー給電アンテナの放射パターン (通常円錐ホーン)



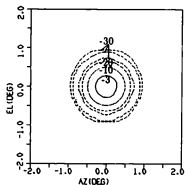
(a) $d_h = 1.0 \lambda$



(b) $d_h = 1.25 \lambda$

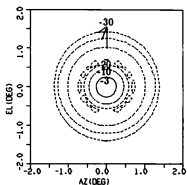


(c) $d_h = 1.5 \lambda$

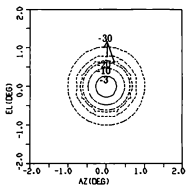


(d) $d_h = 1.75 \lambda$

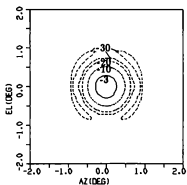
図 5.10: 7 素子ホーンアレー給電アンテナの放射パターン (コルゲート円錐ホーン)



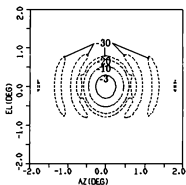
(a) $d_h = 1.0 \lambda$



(b) $d_h = 1.25 \lambda$



(c) $d_h = 1.5 \lambda$



(d) $d_h = 1.75 \lambda$

図 5.11: 7 素子ホーンアレー給電アンテナの放射パターン (矩形ホーン)

5.5 給電アレーの決定

5.5.1 アレー開口面の決定

ホーンアンテナを素子アンテナとする給電アレーにおいて、各ホーンを、その開口が同一平面となるよう配列するものとし、この平面をアレー開口面とよぶことにする。アレー開口面を、図 5.12 の座標系を用いて次式で表わすものとする。

$$z = ax + b \quad (5.15)$$

また、すべての素子アンテナの中心軸 k_h はアレー開口面に垂直な方向に設定するものとする。

$$k_h = \pm \frac{-ai + k}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (5.16)$$

ここで、符号は素子アンテナが反射鏡の方向に向くよう決める。未知数 a, b を次のように決定する。まず、45 個の各地球局に対して、収差を最小とする給電点の位置 s_i および素子アンテナの中心軸の方向 k_{hi} ($i = 1, 2, \dots, 45$) を求める。このとき、アレー開口面を平面とすることによる s_i の位置誤差 δ_i と k_{hi} の方向誤差 θ_i は次のように変わされる。

$$\delta_i = s_i \cdot k_h - \frac{b}{\sqrt{a^2 + 1}} \quad (5.17)$$

$$\theta_i = \cos^{-1}(k_{hi} \cdot k_h) \quad (5.18)$$

これらの誤差はいずれもコンポーネントビームの性能劣化の原因となるため、これらを小さくするよう a, b を決める必要がある。図 4.19 に示した鏡面系においては、方向誤差 θ_i によるコンポーネントビームの利得低下は、位置誤差 δ_i による利得低下に比べてかなり大きいため、 a, b の決め方としては、まず、 a は θ_i の二乗平均が最小となるよう決定し、その後、 b は δ_i の二乗平均が最小となるよう決定した。このとき、 $a = 0.0897, b = 0.1346 \lambda$ となる。

5.5.2 素子アンテナの配列の決定

点 s_{jk} を j 番目のビームに含まれる k 番目の地球局に対して収差を最小とする給電点の位置とするとき ($j = 1 \sim 10, k = 1 \sim N_j, \sum_{j=1}^{10} N_j = 45$)、点 s_{jk} から前節で決めたアレー開口面へおろした垂線の足を s'_{jk} とする。このとき、図 5.13 に示すように、点 s'_{jk} を含む素子ア

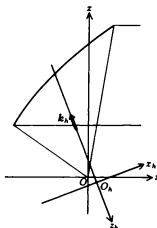


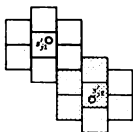
図 5.12: アレー開口面の決定

ンテナとこれに隣接する6個の素子ホーンは必ずビーム j 用の給電アレーに含めるものとする。図 5.13では、説明を簡単にするためにビーム j に含まれる地球局の数 N_j が2個の場合を示しており、(a)のように点 s'_{j1} と点 s'_{j2} とが離れている場合には用いる素子アンテナが両地球局で異なるため計14本の素子アンテナが必要となるが、(b), (c), (d)と点 s'_{j1} と点 s'_{j2} とが接近するにつれて素子アンテナの数は少なくなる。

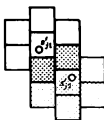
全素子アンテナの配列は以下のように決定する。まず、前節で決めた素子アンテナの大きさと決まる周期で素子アンテナを無限に配列した図を用意し、点 s'_{jk} をプロットした図を重ねる。このとき、 s'_{jk} を含む素子アンテナおよびこの素子アンテナに隣接する6本の素子アンテナの計7本の素子アンテナを j 番目の給電アレーに含める。 k を1から N_j まで変化させることにより、 j 番目の給電アレーに含まれるすべての素子アンテナが決定される。このとき、素子アンテナを配列した図と s'_{jk} をプロットした図との重ね方には、2つの図の成す角度(回転角度)、配列周期の範囲での縦方向、横方向への平行移動に自由度がある。このうち、回転角度については、FFOC アンテナにおいては給電アレーから放射されたグレーティングローブが主反射鏡に当たって不要方向へ放射される可能性が大きいことから、 $x_h z_h$ 面内のグレーティングローブが主ビーム近傍に出ないように、図 5.13の配列を 90° 回転した配列を選

ぶ。また、平行移動については、図 5.13 (c) に破線で示したように、同じ δ'_{jk} の配置であっても、2つの δ'_{jk} の間に素子アンテナの境界を含むように重ねるかと含まないように重ねるかにより、全素子ホーンの数 は 10 本から 7 本に変化する。このことを利用すれば、全素子ホーン の数を最小とする平方移動量が決定できる。なお、このとき、同一偏波で異なるビームが同一の素子ホーンを共用しない条件が必要である。これは、すべてのビームが同じ周波数を用いるものとしているため、同一偏波で異なるビームの信号が同一のホーンに入ってきた場合、この信号を分離できないためである。

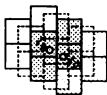
以上により決定した素子アンテナの配列を図 5.14~5.16に示す。図 5.14は V 偏波励振の素子アンテナの配列、図 5.15は H 偏波励振の素子アンテナの配列、図 5.16はこれらを合成した全素子アンテナの配列を示している。



(a) 14 ホーン構成



(b) 12 ホーン構成



(c) 10 ホーン構成



(d) 7 ホーン構成

図 5.13: 素子アンテナの配列の規則

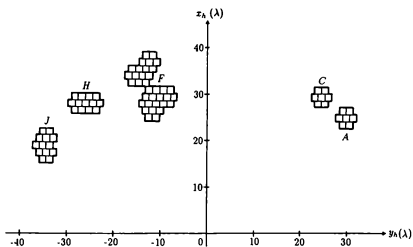


図 5.14: 素子アンテナの配列 (V 偏波用)

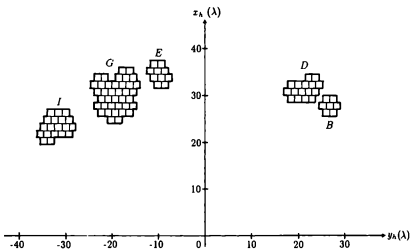


図 5.15: 素子アンテナの配列 (H 偏波用)

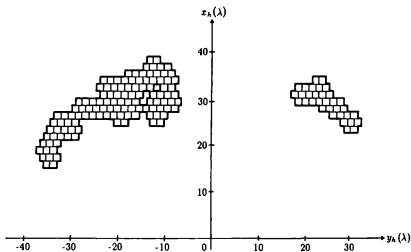


図 5.16: 素子アンテナの配列 (全素子)

5.6 給電アレー励振分布の決定法

給電アレーの励振分布は各ビーム毎に決定する。以下、1本のビームを放射するための給電アレーの励振分布の決定法について検討する。図 5.17に示すように、このビームに含まれる地球局の数を M 、給電アレーを構成する素子アンテナの数を N とする。アレー励振分布と各地球局方向へ放射される電界との間には次の関係がある。

$$\mathbf{a} = H \mathbf{d} \quad (5.19)$$

$$\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_M)^T \quad (5.20)$$

$$\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T \quad (5.21)$$

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

ここで、 h_{ij} は j 番目の素子アンテナを単位電力で励振した場合に i 番目の地球局方向へ放射される電界であり既知である。また、 d_j は j 番目の素子アンテナの励振振幅位相、 a_i はアレーを \mathbf{d} の分布で励振した場合に i 番目の地球局方向へ放射される電界である。ここで、 h_{ij} 、 a_i 、 d_j は一般に複素数である。式 (5.19) に示すように、アレーの励振分布を決めれば地球局方向への放射電界 \mathbf{a} が決まる。 a_i の最小値を最大とすように、励振分布 \mathbf{d} を決めることがここで取り扱う問題である。

5.6.1 励振分布の必要条件

ここでは、各地球局方向への放射電力の最小値を最大とするアレー励振分布 \mathbf{d} は、各地球局方向への放射電力を最大とする分布 \mathbf{b}_i の一次結合で表されることを示す。

(1) i 番目の地球局方向への放射電力を最大とする分布

h_{ij} を用いて、ベクトル \mathbf{h}_i 、 \mathbf{b}_i を次のように定義する。

$$\mathbf{h}_i = (h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{iN})^T \quad (5.23)$$

$$\mathbf{b}_i = \frac{\mathbf{h}_i^*}{\sqrt{\mathbf{h}_i^T \mathbf{h}_i}} = \frac{\mathbf{h}_i^*}{h_i} \quad (5.24)$$

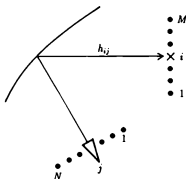


図 5.17: アレー給電反射鏡アンテナ

ここで、アレー励振分布 d を次のように表す。

$$d = c(\alpha b_i + \gamma c) \quad (5.25)$$

$$|c|^2 = \frac{1}{|\alpha|^2 + |\gamma|^2} \quad (5.26)$$

c は b_i に直交する任意の単位ベクトルとする。

$$c^{*T}c = 1 \quad (5.27)$$

$$b_i^{*T}c = 0 \quad (5.28)$$

このとき、 i 番目の地球局方向への放射電界 a_i は次のようになる。

$$a_i = h_i^T d \quad (5.29)$$

$$= h_i \alpha c \quad (5.30)$$

これより、 i 番目の地球局方向への放射電力 G_i は

$$G_i \propto |a_i|^2 \quad (5.31)$$

$$= \frac{h_i^2 |\alpha|^2}{|\alpha|^2 + |\gamma|^2} \quad (5.32)$$

となる。従って、 $\gamma = 0$, 即ち

$$d = b_i \quad (5.33)$$

のとき G_i は最大となる。これは、文献 [85] の結果と一致する。なお、この分布は G_i を最大とする分布ではあるが、この分布による放射パターンは必ずしも i 番目の地球局方向でピークをもつわけではない。

(2) $2 \sim M$ 番目の地球局方向に *Null* 点をもち 1 番目の地球局方向の放射電力が最大となる分布

アレー助振分布 d を次のように表す。

$$d = c \left(\sum_{p=1}^M \alpha_p b_p + \gamma c \right) \quad (5.34)$$

$$|c|^2 = \frac{1}{\left| \sum_{p=1}^M \alpha_p b_p \right|^2 + |\gamma|^2} \quad (5.35)$$

d は $b_1 \sim b_M$ と直交する任意の単位ベクトルで

$$c^{*T} c = 1 \quad (5.36)$$

$$b_i^{*T} c = 0 \quad (i = 1 \sim M) \quad (5.37)$$

とする。このとき i 番目の地球局方向の電界 a_i は

$$a_i = h_i c \sum_{p=1}^M \alpha_p b_i^{*T} b_p \quad (5.38)$$

となる。式 (5.38) より 1 番目の地球局方向への放射電力 G_1 は

$$G_1 \propto |a_1|^2 \quad (5.39)$$

$$= \frac{h_1^2 \left| \sum_{p=1}^M \alpha_p b_i^{*T} b_p \right|^2}{\left| \sum_{p=1}^M \alpha_p b_p \right|^2 + |\gamma|^2} \quad (5.40)$$

となる。従って、 $\gamma = 0$ のとき G_1 は最大となる。また、 $2 \sim M$ 番目の地球局方向に *Null* 点をもつ条件は式 (5.38) の $a_i = 0$ ($i = 2 \sim M$) であり、この連立方程式を解くことによ

り α_i は α_1 によって表されるから、結局、アレー励振分布は b_i の一次結合で表わされる。ただし、 b_p が一次独立であるためには、 $M \leq N$ であることが必要である。

(3) 1～ M 番目の地球局方向への放射電力を最大とする分布

q 番目の地球局方向以外の地球局方向に $Null$ 点を持ち q 番目の地球局方向への放射電力が最大となる分布を d_q とする。 d_q は次式で表される。

$$d_q = \sum_{p=1}^M \alpha_{qp} b_p \quad (5.41)$$

α_{qp} は、 $h_i^T d_q = 0$ ($i \neq q$) の連立方程式を解くことにより決定される。求める分布 d を次のように表す。

$$d = c \left(\sum_{q=1}^M \beta_q d_q + \gamma c \right) \quad (5.42)$$

$$|c|^2 = \frac{1}{\left| \sum_{q=1}^M \beta_q d_q \right|^2 + |\gamma|^2} \quad (5.43)$$

c は、 d_q 即ち $b_1 \sim b_M$ に直交する単位ベクトルとする。このとき i 番目の地球局方向への放射電界 a_i は次のように表される。

$$a_i = h_i c \sum_{q=1}^M \beta_q b_i^* d_q \quad (5.44)$$

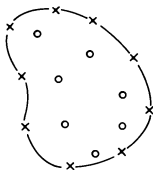
$$= h_i c \beta_i b_i^* d_i \quad (5.45)$$

これより i 番目の地球局方向への放射電力 G_i は

$$G_i \propto |a_i|^2 \quad (5.46)$$

$$= \frac{h_i^2 |\beta_i b_i^* d_i|^2}{\left| \sum_{q=1}^M \beta_q d_q \right|^2 + |\gamma|^2} \quad (5.47)$$

となる。従って、 $\gamma = 0$ が必要条件となり、結局、 d は d_q の一次結合、すなわち b_i の一次結合とすれば良いことになる。



× グループ A の地球局

○ グループ B の地球局

図 5.18: 地球局のグループ分け

5.6.2 最低利得を最大とするアレー励振分布決定アルゴリズム

ここで提案するアレー励振分布決定アルゴリズムを図 5.19 に示す。このアルゴリズムは、 M 個の地球局を、図 5.18 に示すように、グループ A に含まれる M_A 個の地球局とグループ B に含まれる M_B 個の地球局とに分け、アレー励振分布は、グループ A に含まれる地球局方向の利得を等しく、かつ、最大にするよう決定するものである。また、この分布によって決まるグループ B に含まれる地球局方向の利得がグループ A の地球局方向の利得より高くなるよう、グループ A に含まれる地球局とグループ B に含まれる地球局とを分けるものである。なお、解なしの場合には、非線形最適化手法を用いる従来の手法を用いる。このとき、グループ A に含まれる地球局方向の利得を等しく、かつ、最大にするようなアレー励振分布は、以下のように決定する。

地球局方向への放射電力の最小値を最大とする分布は各地球局方向へ放射される電力を最大とする分布 \mathbf{a}_i の一次結合であることを示した。即ち、アレー励振分布は次式で表される。

$$\mathbf{d} = \mathbf{H}^T \mathbf{z} \quad (5.48)$$

$$\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_{M_A})^T \quad (5.49)$$

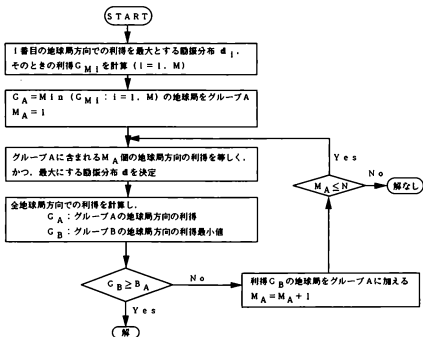


図 5.19: 最低利得を最大とするアレー助振分布決定アルゴリズム

ここでは、アレーに給電される電力は規格化されていない。以下、式 (5.19) で用いた表示において電力が規格化されていない量は ' を付けて区別する。このとき、各地球局方向へ放射される電界 α' は式 (5.19) より次のようになる。

$$\alpha' = H H^{*T} z = E z \quad (5.50)$$

ここで、各地球局方向へ放射される電力を等しくする条件は次のようになる。

$$\alpha'_i = \alpha' \exp(j\phi_i) = \alpha' g_i \quad (i = 1 \sim M_A) \quad (5.51)$$

式 (5.50), (5.48) より次式が得られる。

$$z = E^{-1} \alpha' \quad (5.52)$$

$$d' = H^{*T} E^{-1} \alpha' \quad (5.53)$$

このとき、アレーに給電される全電力 P は

$$P = d'^T d' = \alpha'^T E^{*-1} \alpha' \quad (5.54)$$

となる。従って、アレーを単位電力で給電する場合の動揺分布 d 及び地球局方向への放射電力 G_A は次のようになる。

$$d = \frac{d'}{\sqrt{P}} \quad (5.55)$$

$$G_A = \frac{a^2}{P} = \frac{1}{g^T E^{*-1} g^*} \quad (5.56)$$

$$g = (g_1, g_2, \dots, g_{M_A})^T \quad (5.57)$$

式 (5.54) において、 E^{*-1} は既知の行列であるから、結局、放射電力 G_A は g , 即ち、各地球局方向への放射電界の位相 ϕ_i のみに依存する。式 (5.54) より、 G_A を最大とするには、次式で表される S を最小とすればよいことになる。

$$S = g^T E^{*-1} g^* \quad (5.58)$$

ここで、 E^{*-1} の要素を

$$U_{ii} = |U_{ii}| \exp(j\Phi_{ii}) \quad (5.59)$$

とし、 E^{-1} がエルミート行列であることを考慮すると S は次のようになる。

$$S = \sum_{s=1}^{M_A} \sum_{t=1}^{M_A} g_s U_{st} g_t^* \quad (5.60)$$

$$= \sum_{s=1}^{M_A} U_{ss} + 2S' \quad (5.61)$$

$$S' = \sum_{s=1}^{M_A-1} \sum_{t=s+1}^{M_A} |U_{st}| \cos(\phi_s - \phi_t + \Phi_{st}) \quad (5.62)$$

すなわち、 S を最小とするには式 (5.62) の S' を最小とするよう ϕ_i を選べばよいことになり、その決定法が問題となる。 M_A が大きくなると、各 ϕ_i がそれぞれ極値を持つため、この問題は非常に複雑となるが、例えば、 $M_A = 2$ の場合には式 (5.62) の S' は

$$S' = |U_{12}| \cos(\phi_1 - \phi_2 + \Phi_{12}) \quad (5.63)$$

となるので、地球局方向での位相差 $\phi_1 - \phi_2$ を

$$\phi_1 - \phi_2 = \pi - \Phi_{12} \quad (5.64)$$

と選べばよい。

M_A が 3 以上となると次のように各 ϕ_i を決定する。まず、初期値として ϕ_i ($i = 1 \sim M_A$) を与える。ここで、 L 番目の位相 ϕ_L のみに注目すると S' は次のようになる。

$$S' = A \cos \phi_L + B \sin \phi_L + C \quad (5.65)$$

$$A = \sum_{s=1}^{L-1} |U_{sL}| \cos(\Phi_{sL} + \phi_s) + \sum_{s=L+1}^{M_A} |U_{Ls}| \cos(\Phi_{Ls} - \phi_s) \quad (5.66)$$

$$B = \sum_{s=1}^{L-1} |U_{sL}| \sin(\Phi_{sL} + \phi_s) + \sum_{s=L+1}^{M_A} |U_{Ls}| \sin(\Phi_{Ls} - \phi_s) \quad (5.67)$$

$$C = \sum_{\substack{s=1 \\ s \neq L}}^{M_A} \sum_{\substack{t=1 \\ t \neq L}}^{M_A} |U_{st}| \cos(\phi_s - \phi_t + \Phi_{st}) \quad (5.68)$$

従って、 ϕ_L を初期値として与えた値から次の値に変更すれば S' はある極値となる。

$$\phi_L = \pi + \Phi \quad (5.69)$$

$$\tan \Phi = \frac{A}{B} \quad (5.70)$$

L を $1, 2, \dots, M_A$ と選ぶことにより新たな ϕ_L が決まり、これを繰り返すことにより G_A はある値に収束する。この結果決まる G_A は極値をとるが、他の最適手法と同様、これが真の最大値であるか局所的な極値にすぎないかは最初に与える ϕ_i の初期値に依存する。

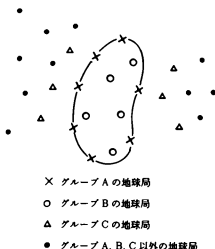


図 5.20: 地球局のグループ分け

5.6.3 ビーム間アイソレーションを考慮したアレー励振分布決定アルゴリズム

マルチビームアンテナの設計に用いる場合には、各ビームのサービスエリア内の地球局方向の最低利得を高めることと共に、同一の周波数および偏波で用いられるビーム間でのアイソレーションを高めることが重要となる。これを考慮してアレー励振分布を決定するアルゴリズムを図 5.21 に示す [84]。ここでは、前項と同様、ある 1 本の成形ビームをつくるのに用いられる素子アンテナの数を N 、このビームに含まれる地球局の数を M 、さらに、アイソレーションを取りたい地球局の数を M' としている。なお、所望のアイソレーションは G_I である。このアルゴリズムでは、 M 個の地球局を、図 5.20 に示すように、グループ A に含まれる M_A 個の地球局とグループ B に含まれる M_B 個の地球局とに分け、また、 M' 個の地球局はグループ C に含まれる M_C 個の地球局とそれ以外の地球局とに分ける。アレー励振分布は、グループ C の地球局方向への放射レベルを零とし、かつ、グループ A に含まれる地球局方向の利得を等しく G_A とする条件のもとで G_A を最大とするよう決定するものである。また、この分布によって決まる M 個の地球局方向の利得は G_A 以上、 M' の地球局方向での利得は G_A/G_I より低くなる。なお、解なしの場合には、非線形最適化手法を用いる従来の手法

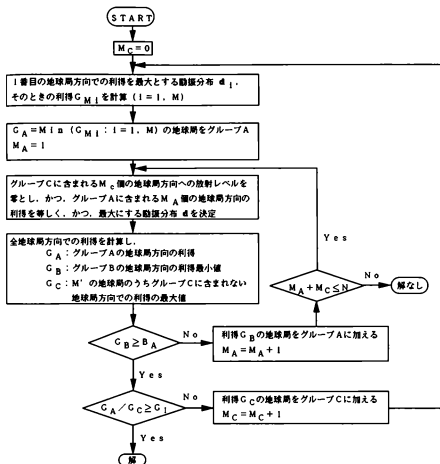


図 5.21: ビーム間アイソレーションを考慮したアレー励振分布決定アルゴリズム

を用いる。

このとき、 N 本の素子アンテナよりなるアレーで給電される反射鏡アンテナにおいて、 M_C 個の地球局方向への放射電界を零とする条件で、 M_A 個の地球局方向への放射電界を等しく、かつ、最大にするアレー励振分布は次のように決定する。

j 番目 ($j = 1, 2, \dots, N$) の素子アンテナを単位電力で励振した場合に i 番目 ($i = 1, 2, \dots, M_A + M_C$) の地球局に放射する電界を h_{ij} とし、これを成分とする $(M_A + M_C) \times N$ のマトリクス H' を定義する。これを用いると、 M_A 個の地球局方向へ放射される電力 G'_A は、前項の結果より、次のように表わされる。

$$G'_A = \frac{1}{g'^T E'^{*-1} g''} \quad (5.71)$$

$$E' = H' H'^{*T} \quad (5.72)$$

$$g' = (g'_1, g'_2, \dots, g'_{M_A+M_C})^T \quad (5.73)$$

$$g'_i = \begin{cases} \exp(j\phi_i) & (i = 1, 2, \dots, M_A) \\ 0 & (i = M_A + 1, M_A + 2, \dots, M_A + M_C) \end{cases} \quad (5.74)$$

この式において、 P'_A を最大するには次式で表される T を最小とすればよいことになる。

$$T = g'^T E'^{*-1} g'' \quad (5.75)$$

ここで、 E'^{*-1} の要素を U'_{ji} とすると、 T は次のようになる。

$$\begin{aligned} T &= \sum_{j=1}^{M_A+M_C} \sum_{i=1}^{M_A+M_C} g'_j U'_{ji} g''_i \\ &= \sum_{j=1}^{M_A} \sum_{i=1}^{M_A} \exp(j\phi_j) U'_{ji} \exp(-j\phi_i) \end{aligned} \quad (5.76)$$

この式は、ビーム間アイソレーションを考慮しない場合の式 (5.60) と全く同じ形であるため、 T を最小とする ϕ_i の決め方は、5.6.2 における S を最小とする ϕ_i の決め方と同じである。なお、当然のことではあるが、得られる結果は異なる。これは、 M_C にかかわらず E' の成分 E_{ik} は $1 \leq i \leq M_A$, $1 \leq j \leq M_A$ では E と同じであるが、 E'^{*-1} の成分 U_{ik} は、 M_C に依存するからである。

5.7 最低利得を最大とするマルチ成形ビームアンテナの設計

5.6.2に示したアルゴリズムにより、図 5.1で定義した各サービスエリアにおいて表 5.1に示した地球局方向での最低利得を最大とするよう、給電アレーの励振分布を決定し、各地球局方向への放射レベルと放射パターンとを計算した。表 5.4と 5.5に各ビームによる同一偏波の地球局方向への放射レベルを示す。なお、— はビーム方向から大きく離れた方向で、励振分布の最適化においては考慮しなかった方向を表わしている。これらの表において、サービスエリア内で最低利得となる地球局がグループ A に含まれる地球局であり、例えば、ビーム G では、10 個の地球局のうち 8 個の地球局がグループ A に含まれることになる。また、最もビーム間アイソレーションが悪いのは、ビーム B からビーム D 方向への放射であり、31.73 dB である。図 5.22～5.25に各ビームの放射パターン計算値を示す。各図において、× は地球局方向を示している。また、利得の等高線は、各サービスエリアにおける最低利得のレベルより 3 dB, 30 dB, 35 dB 低いレベルを描いている。図より、各地球局が効率よく覆われていることがわかる。

なお、これらの計算例においては、 M_A 個の地球局に対する ϕ_i の初期値は、 $M_A - 1$ 個の地球局に対して決めた励振分布によって決まる M_A 個の地球局方向への放射電界の位相としている。

表 5.4: 地球局方向への放射レベル (V 偏波) [dBi]

Beam No.		A	C	F	H	J
Minimum Gain		48.24	48.33	41.82	45.75	46.17
A	1	48.24	12.62	—	—	—
C	4	13.20	48.33	—	—	—
F	12	—	—	41.82	-5.75	—
	13	—	—	41.82	-9.45	—
	14	—	—	42.57	1.81	—
	15	—	—	41.82	1.06	—
	16	—	—	41.82	-13.93	-23.23
	17	—	—	41.82	-0.09	—
	18	—	—	41.82	-12.88	—
	19	—	—	41.82	-0.02	—
	20	—	—	41.82	0.36	—
	21	—	—	41.82	1.14	—
H	32	—	—	5.58	45.75	2.52
	33	—	—	-0.47	45.75	1.80
J	41	—	—	—	-0.04	46.17
	42	—	—	—	-0.91	47.45
	43	—	—	—	-0.81	47.96
	44	—	—	—	-7.44	46.17
	45	—	—	—	-19.10	46.99

表 5.5: 地球局方向への放射レベル (H 偏波) [dBi]

Beam No.		B	D	E	G	I
Minimum Gain		48.12	45.84	47.60	41.74	44.55
B	2	48.12	5.11	—	—	—
	3	48.15	3.25	—	—	—
D	5	16.39	47.14	—	—	—
	6	8.49	45.84	—	—	—
	7	12.36	45.84	—	—	—
E	8	—	—	47.60	6.30	—
	9	—	—	48.03	3.22	—
	10	—	—	47.60	-1.69	—
	11	—	—	47.60	10.70	-26.07
G	22	—	—	-1.36	42.30	1.51
	23	—	—	12.54	41.74	-2.10
	24	—	—	4.70	41.74	-32.57
	25	—	—	-12.51	41.74	-2.16
	26	—	—	3.63	41.74	2.37
	27	—	—	-2.15	42.89	2.43
	28	—	—	3.65	41.74	2.28
	29	—	—	-6.94	41.74	-0.07
	30	—	—	5.30	41.74	-1.33
	31	—	—	4.46	41.74	-1.85
I	34	—	—	—	0.53	44.55
	35	—	—	—	5.06	46.32
	36	—	—	—	3.89	44.55
	37	—	—	—	1.00	44.55
	38	—	—	—	-0.25	44.55
	39	—	—	—	5.34	46.53
	40	—	—	—	-2.10	44.55

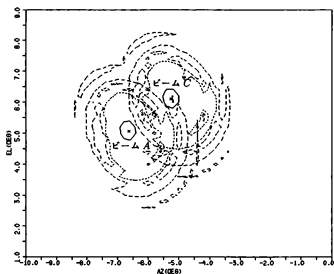


図 5.22: ビーム A, C の放射パターン計算値

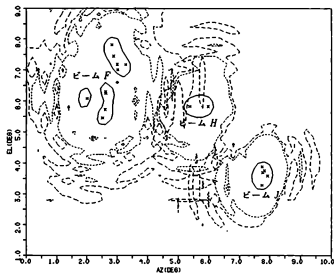


図 5.23: ビーム F, H, J の放射パターン計算値

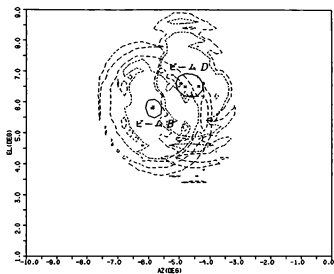


図 5.24: ビーム B, D の放射パターン計算値

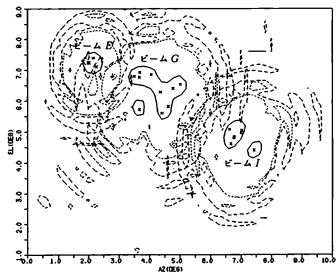


図 5.25: ビーム E, G, I の放射パターン計算値

5.8 ビーム間アイソレーションを考慮したマルチ成形ビームアンテナの設計

5.6.3に示したアルゴリズムにより、図 5.1で定義した各サービスエリアにおいて同一偏波の他のサービスエリアとのビーム間アイソレーションを 40 dB 以上取る条件のもとで表 5.1に示した地球局方向での最低利得を最大とするよう、給電アレーの励振分布を決定し、各地球局方向への放射レベルと放射パターンとを計算した。表 5.6と 5.7に各ビームによる同一偏波の地球局方向への放射レベルを示す。なお、5.7節の計算で 40 dB 以上のビーム間アイソレーションのとれていたビーム D, H, I, J については前の結果と同じである。これらの表において、 $-\infty$ はグループ C に含まれる地球局を表わしており、この方向には強制的に $Null$ をつくっている。表より、ビーム間アイソレーションは、いずれのビームについても、40dB 以上とれていることがわかる。ただし、表 5.4、5.5と比較すると、最大 1.4 dB 利得が低下していることがわかる。

図 5.26～5.29に各ビームの放射パターン計算値を示す。各図において、 \times は地球局方向を示している。また、利得の等高線は、各サービスエリアにおける最低利得のレベルより 3 dB, 30 dB, 35 dB 低いレベルを描いている。図 5.22～5.25と比較すると、同一偏波で異なるビーム方向周辺でのサイドローブレベルが低くなっていることがわかる。

表 5.6: 地球局方向への放射レベル (V 偏波) [dBi]

Beam No.		A	C	F	H	J
Minimum Gain		47.50	47.44	41.61	45.75	46.17
A	1	47.50	-∞	—	—	—
C	4	-∞	47.44	—	—	—
F	12	—	—	41.61	-5.75	—
	13	—	—	41.61	-9.45	—
	14	—	—	42.32	1.81	—
	15	—	—	41.61	1.06	—
	16	—	—	41.61	-13.93	-23.23
	17	—	—	41.61	-0.09	—
	18	—	—	41.61	-12.88	—
	19	—	—	41.61	-0.02	—
	20	—	—	41.61	0.36	—
	21	—	—	41.61	1.14	—
H	32	—	—	-∞	45.75	2.52
	33	—	—	-6.10	45.75	1.80
J	41	—	—	—	-0.04	46.17
	42	—	—	—	-0.91	47.45
	43	—	—	—	-0.81	47.96
	44	—	—	—	-7.44	46.17
	45	—	—	—	-19.10	46.99

表 5.7: 地球局方向への放射レベル (H 偏波) [dBi]

Beam No.		B	D	E	G	I
Minimum Gain		47.87	45.84	47.21	41.62	44.55
B	2	47.87	5.11	—	—	—
	3	48.05	3.25	—	—	—
D	5	-∞	47.14	—	—	—
	6	-2.52	45.84	—	—	—
	7	7.15	45.84	—	—	—
E	8	—	—	47.21	-5.99	—
	9	—	—	47.60	-5.10	—
	10	—	—	47.21	-14.52	—
	11	—	—	47.21	-∞	-26.07
G	22	—	—	-9.15	41.98	1.51
	23	—	—	-∞	41.62	-2.10
	24	—	—	-2.92	41.62	-32.57
	25	—	—	-4.54	41.62	-2.16
	26	—	—	-7.70	41.62	2.37
	27	—	—	-∞	42.75	2.43
	28	—	—	-9.91	41.62	2.28
	29	—	—	-0.73	41.62	-0.07
	30	—	—	-8.52	41.62	-1.33
	31	—	—	-5.66	41.62	-1.85
I	34	—	—	—	-2.61	44.55
	35	—	—	—	-22.62	46.32
	36	—	—	—	-8.25	44.55
	37	—	—	—	-10.76	44.55
	38	—	—	—	-11.27	44.55
	39	—	—	—	-∞	46.53
	40	—	—	—	-10.10	44.55

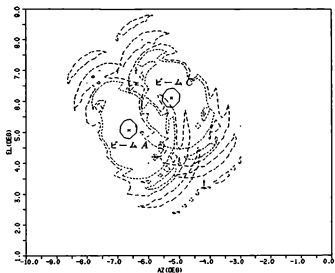


図 5.26: ビーム A, C の放射パターン計算値

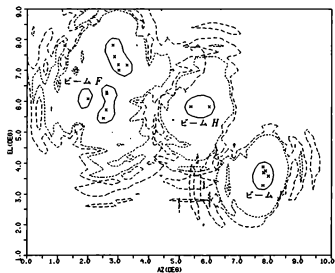


図 5.27: ビーム F, H, J の放射パターン計算値

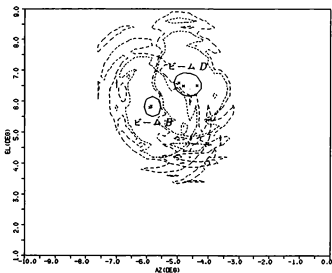


図 5.28: ビーム B, D の放射パターン計算値

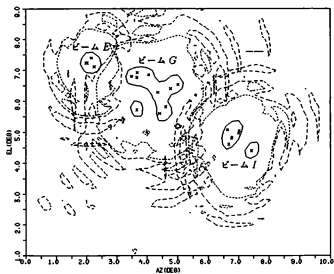


図 5.29: ビーム E, G, I の放射パターン計算値

5.9 試作アンテナの放射特性

以上に示した設計法の有効性を調べるため、ビーム A , B , C , D 用のホーンアレーを試作し、4.6節で試作した $FFOC$ アンテナと組み合わせて放射パターンの測定を行った。アレーを構成する素子アンテナとしては $18.75\text{ mm} \times 18.75\text{ mm}$ の矩形ホーンを用いている。アレーを構成する素子ホーンの総数は 33 本であり、図 5.14, 5.15 に示したように、ビーム A , B , C , D に対して、それぞれ、7 本、7 本、7 本、16 本を配している。図 5.30 に給電アレーの写真を示す。励振振幅は抵抗減衰器で、励振位相は移相器と線路長とで所望の値に設定している。

図 5.31, 5.32 に、放射パターン実測値を示す。これらは、5.7 節で設計した、地球局方向での最低利得を最大とする励振分布に設定した場合である。図に示すように、地球局は効率よくカバーされていることがわかる。また、ビーム間アイソレーションに関しては、ビーム D のビーム B 方向へのサイドローブ以外は、 -30 dB 以下となっていることがわかる。そこで、ビーム D の放射パターンを改善すべく、ビーム D の励振分布を 5.8 節で設計した値に変更して放射パターンを測定した。その結果を図 5.33 に示す。図より、 30 dB 以上のビーム間アイソレーションが得られていることがわかる。

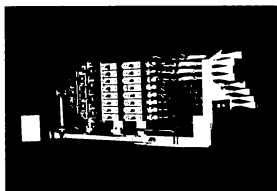


図 5.30: 給電アレーの外観

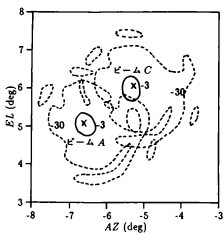


図 5.31: ビーム A, C の放射パターン測定値

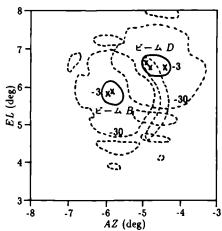


図 5.32: ビーム B, D の放射パターン測定値

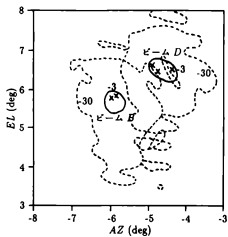


図 5.33: ビーム B, D の放射パターン測定値 (ビーム間アイソレーションを考慮)

5.10 結言

ビーム間アイソレーションを所望の値とする条件のもとで、サービスエリア内の地球局方向への放射電力の最小値を最大とする給電アレー設計法について検討した。まず、給電アレーを構成する素子アンテナの形状と大きさに最適値があることを基本ビームモードを用いた簡易式と数値計算によって明らかにした。次に、素子アンテナの配列法として、同一周波数、同一偏波の異なるビームが同一の素子アンテナを共有しない条件で自動的に素子配列を決定するアルゴリズムを示した。さらに、給電アレーを構成する素子アンテナの数がサービスエリア内の地球局の数より多い場合において地球局方向への放射電力の最小値を最大とするアレー励振分布に対する必要条件を求め、この結果にもとづいた給電アレー励振分布決定アルゴリズムを示した。

これを、国際通信衛星搭載を想定したアレー給電 *FFOC* 形式マルチ成形ビームアンテナの一次放射器の設計に適用し、数値計算および試作モデルアンテナによる測定によりその有効性を確認した。その結果、サービスエリアを効率よくカバーし、30 dB 以上のビーム間アイソレーションを実現するマルチ成形ビームアンテナが得られることが明らかになった。

第 6 章

結論

本論文は、将来の国際通信衛星搭載用アンテナに必要と思われる、地球を多数の細い成形ビームで覆うようなマルチビームアンテナを実現するため、ビーム偏向による性能劣化の小さい鏡面系、および、効率よくサービスエリアをカバーする給電アレーについて研究した成果をまとめたものである。以下に具体的内容を述べる。

第 2 章では、従来のオフセット複反射鏡形式であるオフセットカセグレン (OC) アンテナとオフセットグレゴリアン (OG) アンテナを国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナに適用する場合の性能限界を明らかにした。まず、一次放射器を任意の位置に配置した場合の放射特性を、副反射鏡は幾何光学、主反射鏡は電流分布法で計算するための理論式を示した。次に、自由度のある 6 個の鏡面設計パラメータを交差偏波消去条件、ブロッキングを避ける条件等を用いて 2 個に減じ、これらの設計パラメータと実現できる鏡面構成およびそのビーム偏向特性との関係を示した。その結果、OC 形式では、電気的性能は非常に優れているものの、機械的制約により実用的なマルチビームアンテナを構成できないこと、OG 形式では、実用的なマルチビームアンテナを構成できるが、ビーム偏向による利得低下は 7.3dB、交差偏波レベルは -18dB 程度の性能が限界であることが明らかになった。

第 3 章では、二次元的にビーム偏向した場合において収差の小さい鏡面を設計する手法を示した。この手法は、主反射鏡の形状をオフセットパラボラに選び、目的とする複数のビーム方向での収差を最小とするよう、一次放射器の位置と副反射鏡の形状を決定するものである。この鏡面設計法によれば、主反射鏡の形状を与えれば、目的とする複数の方向での収差を最小にするような副反射鏡の形状および一次放射器の位置が決定できる。また、ここに示した修整関数を用いれば、ビーム偏向のない場合の特性を変えることなく、ビーム偏向時の特

性を改善することが可能である。この鏡面修整法を *OG* アンテナに適用し、数値計算によりその有効性を確認した。その結果、設計したアンテナのビーム偏向時における収差による利得低下は最悪値で 6.5dB から 3.3dB へと大幅に改善できることを明らかにした。ただし、交差偏波レベルの最悪値は約 -20dB で鏡面修整を施す前とほとんど変わらない。

第4章では、フロントフィードオフセットカセグレン (*FFOC*) アンテナを考案し、その設計パラメータと実現できる鏡面構成、および、ビーム偏向特性との関係を示した。次に、衛星搭載用であることを考慮して設計パラメータを選定し、数値計算および試作モデルアンテナによる測定により、その優れたビーム偏向特性を確認した。その結果、設計したアンテナのビーム偏向時における収差による利得低下は最悪値で 2.0dB、交差偏波レベルの最悪値は約 -38dB であり、所期の性能を十分満足するものであることを明らかにした。これらの検討結果より、*FFOC* 形式は、他の形式に比べて、ビーム偏向による性能劣化が少なく、コンパクトに設計できるため、国際通信衛星搭載用マルチビームアンテナに適していることが明らかになった。

第5章では、ビーム間アイソレーションを所望の値とする条件のもとで、サービスエリア内の地球局方向への放射電力の最小値を最大とする給電アレー設計法について検討した。これを *FFOC* アンテナの一次放射器として適用したマルチ成形ビームアンテナを設計し、数値計算および試作モデルアンテナによる測定によりその有効性を確認した。その結果、サービスエリアを効率よく覆い、30dB 以上のビーム間アイソレーションを実現するマルチ成形ビームアンテナが得られることが明らかになった。

本研究の成果の一部は、インテルサットより受注した *R&D* である、'INTEL-193: Dual Reflector Multibeam Space-craft Antenna' で達成されたものであり、インテルサットより高く評価された。また、この研究成果は、国内通信衛星搭載用マルチビームアンテナやマルチビーム地球局アンテナにも適用できるものである。NTT で実用になった *Ku* 帯マルチビーム地球局アンテナや、現在実用に向けて開発中の国内通信衛星 *N-STAR* 搭載 *Ka* バンドアンテナは、本成果によるところが大きい。

謝辞

本研究を進めるに当たり、御懇切なる御指導ならびに御鞭撻を賜りました京都大学教授木村 磐根博士に衷心より感謝の意を表します。また、本論文をまとめるに際し、有益な御討論、御助言を頂きました京都大学教授小倉久直博士、同教授吉田進博士に深く感謝致します。

本研究の機会を与えて頂くとともに、御指導ならびに御鞭撻を頂きました三菱電機株式会社社友喜連川隆博士、同社開発本部技師長橋本勉博士に深謝致します。また、本研究の遂行ならびに本論文をまとめるに当たり、御指導、御教示を頂きました同社電子システム研究所長片木孝至博士に深謝致します。

本論文の内容について貴重な御指導、御助言を頂きました三菱電機株式会社電子システム研究所アンテナ開発部長浦崎修治博士、同社鎌倉製作所 N-STAR プロジェクトプロジェクトマネージャー小林右治氏に感謝致します。また、御指導を頂きました岡山理科大学教授武田文雄博士、三菱電機株式会社電子システム研究所光・電波システム方式部次長真野清司博士、同所光・マイクロ波開発部次長石田修己博士に感謝致します。

本論文における計算および実験に御協力を頂いた三菱電機株式会社鎌倉製作所宇宙主幹大久保邦人氏、同所技術部主事野口龍宏氏、同所次世代衛星事業開発センター主事宮原典夫氏ならびに同社電子システム研究所アンテナ開発部内藤出氏に感謝致します。

本研究は、以上のほか数多くの方々の御指導、御協力のもとに達成されたものであり、ここに慎んで御礼申し上げます。

参考文献

- [1] W. J. English, "Improving Future Satellite Antenna Design," AIAA 8th Int. Communications satellite Syst.Conf., 1980, pp. 464-470.
- [2] J. Dicks and M. Brown, "Intelsat IV-A Transmission System Design," Comsat Technical Review, 5, 1, Spring 1975, pp. 73-103.
- [3] E. T. Jilg, "The Intelsat IV Spacecraft," Comsat Technical Review, 2, 2, Fall 1972, pp. 271-271.
- [4] R. J. Rusch, J. T. Johnson and E. Baer "Intelsat V Spacecraft Design Summary," AIAA 7th Int. Communications satellite Syst.Conf., 1978, pp. 8-20.
- [5] 機井, 村谷, "インテルサット V号時代の衛星通信", 信学誌, 61, 9, 1978, pp. 992-998.
- [6] M. F. Caulfield, F. A. Taormina, B. M. Flynn, S. O. Lane, T. M. Paige and V. E. Cascia, "Intelsat VI Antenna System Design and Development," NASA conf. publ., NASA-CP-2269-PART-2, 1983, pp.743-765.
- [7] 岩崎, 平田, "インテルサット VI号衛星システム", 信学誌, 64, 12, 1981, pp. 1269-1273.
- [8] G. R. Wellti, "Intelsat Architectures for the 1990'," IEEE Int. Conf. on Communication, 1982.
- [9] S. Silver, *Microwave Antenna Theory and Design*, McGraw Hill, New York, 1949.
- [10] 進士, 安達, "マルチビームアンテナ", 信学誌, 60, 5, 1977, pp. 544-551.

- [11] 手代木, 熊沢, "衛星搭載用マルチビームアンテナ", 信学誌, 65, 10, 1982, pp. 1060-1067.
- [12] J. Ruze, "*Lateral-Feed Displacement in a Paraboloid*," IEEE Trans. Antennas propagat., AP-13, 5, Sep. 1965, pp. 660-665.
- [13] W. A. Imbriale, P. G. Ingerson, and W. C. Wong, "*Large Lateral Feed Displacement in a Parabolic Reflector*," IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-22, 6, 1974, pp. 742-745.
- [14] A. W. Rudge, "*Multiple-Beam Antennas: Offset Reflectors with Offset Feeds*," IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-23, 3, 1975, pp. 317-322.
- [15] A. V. Mrstic, "*Scan Limits of Off-Axis Fed Parabolic Reflector*," IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-27, 5, 1979, pp. 647-651.
- [16] C. C. Chen, C. E. Franklin and W. F. Croswel, "*Ku-Band Multiple Beam Antennas for Contiguous Spot Beam Coverage of CONUS*," IEEE AP-S, AP3, 3, 1980.
- [17] C. C. Han, A. E. Smoll, H. W. Bilenko, C. A. Chuang and C. A. Klein, "*A General Beam Shaping Technique - Multiple-Feed Offset Reflector Antenna System*," AIAA 6th Int. Communications satellite Syst.Conf., 1976.
- [18] V. G. Israel, S. W. Lee and R. Mittra, "*Synthesis of a Laterally Displaced Cluster Feed for a Reflector Antenna with Application to Multiple Beams and Contoured Pattern*," IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-26, 2, 1978.
- [19] C. C. Chen, C. E. Franklin, W. C. Wong and W. F. Croswell, "*CONUS Time Zone Coverage Contoured Beam Antenna*," IEEE AP-S, AP3, 4, 1980.
- [20] S. W. Lee and Y. R. Samii, "*Simple Formulas for Designing an Offset Multibeam Parabolic Reflector*," IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-29, 3, 1981.

- [21] 片木, 浦崎, 蛭子井, 別段, “集束ビーム給電系のビームモード展開による解析および設計法”, 信学論 (B), J66-B, 3, 1983, pp. 305-311.
- [22] 別段, 片木, 浦崎, “4枚反射鏡形集束ビーム給電系の設計法”, 信学論 (B), J67-B, 6, 1984, pp. 622-629.
- [23] 浦崎, 牧野, “ビームモード展開法によるオフセットパラボラアンテナのビーム偏向特性の解析”, 信学技報, AP84-27, 1984.
- [24] 田中, 水沢, “オフセット複反射鏡アンテナにおける交差偏波の消去”, 信学論 (B), 58-B, 12, 1975, pp. 643-650.
- [25] E. A. Ohm, “A Proposed Multiple-Beam Microwave Antenna for Earth Stations and Satellites,” B.S.T.J., Oct. 1974, pp. 1657-1665.
- [26] W. C. Wong, “On the Equivalent Parabola Technique to Predict the Performance Characteristics of a Cassegrain System with an Offset Feed,” IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-21, 3, 1973, pp. 335-339.
- [27] M. Akagawa and F. Difonzo, “Beam Scanning Characteristics of Offset Gregorian Antennas,” IEEE AP-S, AP4(b), 3, 1979.
- [28] V. Krichvsky and D. F. Difonzo, “Optimum Feed Locus for Beam Scanning in Offset Cassegrain Antennas,” IEEE AP-S, AP2, 6, 1980.
- [29] V. Krichvsky and D. F. Difonzo, “Optimum Feed Locus for Beam Scanning in the Symmetry Plane of Offset Cassegrain Antennas: Two-Dimensional Case,” Comsat Technical Review, 11, 1, Spr. 1981, pp. 131-157.
- [30] V. Krichvsky and D. F. Difonzo, “Beam Scanning in the Offset Gregorian Antenna,” Comsat Technical Review, 12, 2, Fall 1982, pp. 251-269.
- [31] R. M. Brown, “Dielectric Bifocal Lenses,” IRE Nato. Conv. Record Pt. 1, 1956, pp.180-187.

- [32] 刈込, “ビーム走査の可能な双反射鏡アンテナ”, 信学論 (B), 55-B, 10, 1972, pp. 547-554.
- [33] 熊沢, “衛星とう載用双反射鏡形マルチビームアンテナ”, 信学論 (B), 58-B, 8, 1975, pp. 377-384.
- [34] 本間, 片木, 水沢, 熊沢, “回転対称な複反射鏡マルチビームアンテナ”, 信学論 (B), J64-B, 7, 1981, pp. 690-697.
- [35] 安藤, 熊沢, 上野, “双焦点オフセットカセグレンマルチビームアンテナの放射特性”, 昭56 信学総全大, 681, 1981.
- [36] 水口, 渡辺, “オフセット双焦点アンテナ”, 信学論 (B), J66-B, 1, 1983, pp. 71-78.
- [37] C. M. Rappaport, “An Offset Bifocal Reflector Antenna Design for Wide-Angle Beam Scanning,” IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-32, 11, 1984, pp. 1196-1204.
- [38] N. C. Albertsen, K. Pontoppidan and S. B. Sorensen, “Shaping of Dual Reflector Antennas for Improvement of Scan Performance,” IEEE AP-S, AP10, 4, 1985.
- [39] 水口, 渡辺, 野本, “マルチビーム用多焦点アンテナの鏡面設計法”, 信学技報, AP84-28, 1984.
- [40] 野本, 水口, “多焦点アンテナの放射特性”, 信学技報, AP85-85, 1985.
- [41] 上野, 安藤, 熊沢, “衛星搭載用マルチビーム/成形ビーム共用アンテナ”, 信学論 (B), J66-B, 5, 1983, pp. 631-638.
- [42] K. S. Rao, G. A. Morin and K. K. Chan, “Multiple Beam Antenna Design for the Canadian EHF Satcom,” IEEE AP-S, 100.2, 1991.
- [43] R. Capone, S. Contu and F. Rispoli, “An Advanced Multiple-Beam Antenna for Italsat F2 Satellite,” IEEE AP-S, 100.5, 1991.

- [44] R. J. Acosta, J. Larko, A. Narvaez and A. R. Lagin, "Advanced Communication Technology Satellite (ACTS) Multibeam Antenna Analysis and Experiment," IEEE AP-S, RA01, 8, 1992.
- [45] C. C. Chen and C. F. Franklin, "Ku-Band Multiple Beam Antenna," NASA Contract Rep. 154364, 1980.
- [46] 鹿子嶋, 伊丹, 山田, "クラスタホーン給電オフセットパラボラアンテナの放射特性について", 信学技報, AP83-66, 1983.
- [47] N. A. Adatia, B. Claydin and D. Brain, "Primary-Feed Elements for Multiple and Contoured Beam Satellite Antennas," Proc. IEE ICAP, 1981, pp.98-103.
- [48] M. Afifi and P. Folds, "Optimum Contiguous Multibeam Antenna Coverage," IEEE AP-S, AP3, 1, 1980.
- [49] A. I. Zaghloul, R. R. Persinger and D. F. Difonzo, "Design Optimization Procedures for Multi-Feed Satellite Shaped-Beam Antennas," Proc. Eur. Microwave Conf., wp3203/K5-R1, 1982.
- [50] 中條, 手代木, "重複開口アレー給電マルチビームアンテナ", 信学技報, AP83-140, 1984.
- [51] 諸岡, 上野, "クラスタ給電マルチビームアンテナのサービスエリア利得とビーム間干渉量", 昭 59 信学光・電波全大, 93, 1984.
- [52] 近藤, 館沢, "Ka/C/S帯共用衛星搭載用マルチビームアンテナの設計", 信学論 (B-2), J72-B-2, 10, 1989, pp. 541-548.
- [53] H. Shoki, T. Morooka, K. Kawabata and M. Ueno, "A Pattern Synthesis Method for a Multiple Beam Reflector Antenna with Cluster Feeds," Proc. of ISAP, 111-3, 1985.
- [54] C. A. Klein, "Design of Shaped-Beam Antennas through Minimax Gain Optimization," IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-32, 9, 1984, pp. 963-968.

- [55] K. Madsen and H. Schjaer-Jacobsen, "A Nonlinear Minimax Optimization Program not Requiring Derivatives," IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-25, 1977, pp. 454-456.
- [56] 牧野, 野口, 内藤, 蛭子井, 大内, 浜本, 竹内, 鈴木, "ミニマックス法を用いた高ビーム間アイソレーションマルチビームアンテナの設計", 信学技報, AP90-83, 1990.
- [57] 志水, システム制御と数値計画法, コロナ社, 1971.
- [58] M. Ando, "Beam Scanning Characteristics of Reflector Antennas with Array Feeds," Trans. IECE Japan (E), E67, 6, 1984, pp. 323-330.
- [59] T. S. Bird and J. L. Boomers, "Evaluation of Focal Field and Radiation Characteristics of a Dual-Offset Reflector Antenna," IEE Proc. Pt. H, 127, 4, 1980.
- [60] Y. Yamada and K. Kagoshima, "Design of Side-Lobe Characteristics of Offset Parabolic Antenna with Cluster Feed by Receiving Mode Analysis," IEEE AP-S, 1984.
- [61] 水沢, 片木, "多重反射鏡形アンテナの等価パラボラ表示とその応用", 三菱電機技報, 49, 11, 1975, pp. 729-732.
- [62] 熊沢, 板波, 上野, 大友, "マルチバンド衛星搭載用アンテナ系の構成と技術", 1991 信学春全大, B-188, 1991.
- [63] 牧野, 小林, 浦崎, 片木, "フロントフィードオフセットカセグレン形式マルチビームアンテナのビーム偏向特性", 信学論 (B), J69-B, 11, 1986, pp. 1453-1461.
- [64] 水口, 渡辺, "双反射鏡形マルチビームアンテナの鏡面設計法", 昭 57 信学光・電波全大, 68, 1982.
- [65] 牧野, 小林, 片木, "オフセット二次曲面鏡マルチビームアンテナにおける副反射鏡の最適修整法", 信学技報, AP83-91, 1983.
- [66] 牧野, 小林, 片木, "パラボラ主反射鏡と修整副反射鏡よりなるオフセット複反射鏡形マルチビームアンテナの鏡面設計法", 信学論 (B), J69-B, 9, 1986, pp. 933-940.

- [67] 牧野, 浦崎, 片木, “オフセット複反射鏡形式マルチビームアンテナにおける鏡面修整の方法”, 昭 58 信学総全大, 764, 1983.
- [68] “アンテナ装置”, 日本国登録特許, 登録番号 1684916, 登録日 1992 年 7 月 31 日.
- [69] “アンテナ装置”, 米国登録特許, 登録番号 4618866, 登録日 1986 年 10 月 21 日.
- [70] “アンテナ装置”, 英国登録特許, 登録番号 2130804, 登録日 1986 年 9 月 10 日.
- [71] “アンテナ装置”, 独出国願特許, 出願番号 P3341284.7.
- [72] 牧野, 小林, 浦崎, 片木, “フロントフィードオフセットカセグレン形式マルチビームアンテナ”, 信学技報, AP83-138, 1984.
- [73] 牧野, 小林, 片木, “フロントフィードオフセットカセグレン形式マルチビームアンテナ”, 昭 59 信学総全大, S19-6, 1984.
- [74] 牧野, 宮原, 小林, 大久保, 片木, “フロントフィードオフセットカセグレン形式マルチビームアンテナの放射特性”, 昭 59 信学光・電波全大, 91, 1984.
- [75] 牧野, 宮原, 小林, 大久保, 片木, “フロントフィードオフセットカセグレン形式マルチビームアンテナの放射特性”, 信学技報, AP85-9, 1985.
- [76] S. Makino, Y. Kobayashi, T. Katagi, “*Front Fed Offset Cassegrain Type Multibeam Antenna*,” IEEE AP-S, APS10-2, 1985.
- [77] C. Dragone, “*A First-Order Correction of Abberations in Cassegrain and Gregorian Antennas*,” IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-31, 5, 1983.
- [78] R. Jorgensen, P. Balling and W. J. English, “*Dual Offset Reflector Multibeam Antennas for International Communications Satellite Applications*,” IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-33, 12, 1985.
- [79] 牧野, 浦崎, 武田, “基本ビームモードを用いたクラスター給電マルチビームアンテナの簡易設計法”, 昭 60 信学総全大, 690, 1985.

- [80] 牧野, 浦崎, “アレー給電反射鏡形成形ビームアンテナの設計”, 信学技報, AP85-76, 1985
- [81] S. Makino, S. Urasaki and T. Katagi, “*Design of Array-Fed Multiple Shaped Beam Antenna through Maximizing Minimum Gain*,” Proc. of ISAP'85, 111-4, 1985.
- [82] 牧野, 内藤, 浦崎, 片木, “アレー給電反射鏡形成形ビームアンテナにおけるアレー励振分布決定法”, 信学論 (B-2), J74-B-2, 10, 1991, pp. 531-537.
- [83] 牧野, 浦崎, 小林, 大久保, 片木, “クラスター給電 FFOC 形式マルチビームアンテナ”, 昭 61 信学総全大, 663, 1986.
- [84] 牧野, 浦崎, 赤石, “ビーム間アイソレーションを考慮したマルチ成形ビームアンテナの設計”, 昭 60 信学光・電波全大, S3-4, 1986.
- [85] H. Steyskal, “*On Antenna Power Pattern Synthesis*,” IEEE Trans. Antennas Propagat., AP-318, 1, 1970, pp. 123-124.

付録 A

各スカラー、ベクトルの偏微分

2章の計算に必要な各スカラー、ベクトルの偏微分を示す.

$$g_1 = \frac{\partial r}{\partial \theta_1} \quad (\text{A.1})$$

$$g_2 = \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial r}{\partial \phi_1} \quad (\text{A.2})$$

$$h_0 = \frac{\partial g_1}{\partial \theta_1} = \frac{\partial^2 r}{\partial \theta_1^2} \quad (\text{A.3})$$

$$h_1 = -\frac{\partial g_2}{\partial \theta_1} = \frac{1}{\sin \theta_1} \left(g_2 \cos \theta_1 - \frac{\partial g_1}{\partial \phi_1} \right) \quad (\text{A.4})$$

$$h_2 = \frac{1}{\sin \theta_1} \left(g_1 \cos \theta_1 + \frac{\partial g_2}{\partial \phi_1} \right) \quad (\text{A.5})$$

$$(\text{A.6})$$

と置き,

$$g = \frac{1}{2} (r^2 + g_1^2 + g_2^2) \quad (\text{A.7})$$

と定義すると,

$$\mathbf{n}_s = \frac{r\mathbf{e}_r - g_1\mathbf{e}_\theta - g_2\mathbf{e}_\phi}{\sqrt{2g}} \quad (\text{A.8})$$

となる. これらを用いると, 各スカラー、ベクトルの偏微分は次のようになる.

$$\frac{\partial r_{W1}}{\partial \theta_1} = l_1 \frac{\partial e_1}{\partial \theta_1} \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial r_{W1}}{\partial \phi_1} = l_1 \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial e_1}{\partial \phi_1} \right) \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\partial r_{W2}}{\partial \theta_1} = \frac{\partial l_1}{\partial \theta_1} e_1 + l_1 \frac{\partial e_1}{\partial \theta_1} - \frac{\partial l_1}{\partial \theta_1} e_2 + l_2 \frac{\partial e_2}{\partial \theta_1} \quad (\text{A.11})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{r}_{w2}}{\partial \phi_1} = \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial l_1}{\partial \phi_1} \right) \mathbf{e}_1 + l_1 \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_1}{\partial \phi_1} \right) - \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial l_1}{\partial \phi_1} \right) \mathbf{e}_2 + l_2 \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \phi_1} \right) \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial \theta_1} = g_1 \mathbf{e}_r + r \mathbf{e}_\theta + \frac{\partial l_2}{\partial \theta_1} \mathbf{e}_2 + l_2 \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \theta_1} \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{r}_m}{\partial \phi_1} = g_2 \mathbf{e}_r + r \mathbf{e}_\phi + \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial l_2}{\partial \phi_1} \right) \mathbf{e}_2 + l_2 \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \phi_1} \right) \quad (\text{A.14})$$

$$\frac{\partial l_2}{\partial \theta_1} = \frac{- \left(\frac{\partial A}{\partial \theta_1} l_2^2 + 2 \frac{\partial B}{\partial \theta_1} l_2 + \frac{\partial C}{\partial \theta_1} \right)}{2(A l_2 + B)} \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial l_2}{\partial \phi_1} = \frac{- \left[\left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial A}{\partial \phi_1} \right) l_2^2 + 2 \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial B}{\partial \phi_1} \right) l_2 + \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial C}{\partial \phi_1} \right]}{2(A l_2 + B)} \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial A}{\partial \theta_1} = -2(\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{k}) \left(\frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \theta_1} \cdot \mathbf{k} \right) \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial A}{\partial \phi_1} = -2(\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{k}) \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \phi_1} \cdot \mathbf{k} \right) \quad (\text{A.18})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial \theta_1} = & g_1 [(\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_r) - (\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{k})(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k})] \\ & + r \left[\left(\frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \theta_1} \cdot \mathbf{e}_r \right) + (\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_\theta) \right. \\ & \quad \left. - \left(\frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \theta_1} \cdot \mathbf{k} \right) (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k}) - (\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{k})(\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{k}) \right] \\ & - 2ae \sin \alpha \left(\frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \theta_1} \cdot \mathbf{i} \right) - 2f_m \left(\frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \theta_1} \cdot \mathbf{k} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial B}{\partial \phi_1} = & g_2 [(\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_r) - (\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{k})(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k})] \\ & + r \left[\left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \phi_1} \cdot \mathbf{e}_r \right) + (\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_\phi) \right. \\ & \quad \left. - \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \phi_1} \cdot \mathbf{k} \right) (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k}) - (\mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{k})(\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{k}) \right] \\ & - 2ae \sin \alpha \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \phi_1} \cdot \mathbf{i} \right) - 2f_m \left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \phi_1} \cdot \mathbf{k} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial C}{\partial \theta_1} &= 2rg_1 \left[1 - (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k})^2 \right] - 2r^2 (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k}) (\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{k}) \\ &\quad - 4f_m [g_1 (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k}) + r (\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{k})] \\ &\quad - 4ae \sin \alpha [g_1 (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{i}) + r (\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{i})]\end{aligned}\quad (\text{A.21})$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial C}{\partial \phi_1} &= 2rg_2 \left[1 - (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k})^2 \right] - 2r^2 (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k}) (\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{k}) \\ &\quad - 4f_m [g_2 (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{k}) + r (\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{k})] \\ &\quad - 4ae \sin \alpha [g_2 (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{i}) + r (\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{i})]\end{aligned}\quad (\text{A.22})$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \theta_1} = \frac{\partial \mathbf{e}_1}{\partial \theta_1} - 2 \left[\left(\frac{\partial \mathbf{e}_1}{\partial \theta_1} \cdot \mathbf{n}_s \right) + \left(\mathbf{e}_1 \cdot \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \theta_1} \right) \right] \mathbf{n}_s - 2 (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{n}_s) \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \theta_1} \quad (\text{A.23})$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_2}{\partial \phi_1} &= \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_1}{\partial \phi_1} - 2 \left[\left(\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_1}{\partial \phi_1} \cdot \mathbf{n}_s \right) + \left(\mathbf{e}_1 \cdot \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi_1} \right) \right] \mathbf{n}_s \\ &\quad - 2 (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{n}_s) \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi_1}\end{aligned}\quad (\text{A.24})$$

$$\frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \theta_1} = \frac{1}{\sqrt{2g}} \left[-\frac{1}{\sqrt{2g}} \frac{\partial g}{\partial \theta_1} \mathbf{n}_s + 2g_1 \mathbf{e}_r + (r - h_0) \mathbf{e}_\theta + h_1 \mathbf{e}_\phi \right] \quad (\text{A.25})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{n}_s}{\partial \phi_1} = \frac{1}{\sqrt{2g}} \left[-\frac{1}{\sqrt{2g}} \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial g}{\partial \phi_1} \mathbf{n}_s + 2g_2 \mathbf{e}_r + h_1 \mathbf{e}_\theta + (r - h_2) \mathbf{e}_\phi \right] \quad (\text{A.26})$$

$$\frac{\partial g}{\partial \theta_1} = (r + h_0) g_1 - g_2 h_1 \quad (\text{A.27})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial g}{\partial \phi_1} = (r + h_2) g_2 - g_1 h_1 \quad (\text{A.28})$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_1}{\partial \theta_1} = \frac{1}{l_1} \left(g_1 \mathbf{e}_r + r \mathbf{e}_\theta - \frac{\partial l_1}{\partial \theta_1} \mathbf{e}_1 \right) \quad (\text{A.29})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial \mathbf{e}_1}{\partial \phi_1} = \frac{1}{l_1} \left(g_2 \mathbf{e}_r + r \mathbf{e}_\phi - \frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial l_1}{\partial \phi_1} \mathbf{e}_1 \right) \quad (\text{A.30})$$

$$\frac{\partial l_1}{\partial \theta_1} = \frac{1}{l_1} [rg_1 - g_1 (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{s}) - r (\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{s})] \quad (\text{A.31})$$

$$\frac{1}{\sin \theta_1} \frac{\partial l_1}{\partial \phi_1} = \frac{1}{l_1} [rg_2 - g_2 (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{s}) - r (\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{s})] \quad (\text{A.32})$$

なお、副反射鏡が回転二次曲面鏡の場合には、 g_1, g_2, h_0, h_1, h_2 はそれぞれ、次のようになる。

$$r = \frac{\delta p a (\bar{e}^2 - 1)}{1 + \bar{e} (\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{I})} \quad (\text{A.33})$$

$$g_1 = -\frac{r\tilde{\epsilon}(\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{l})}{1 + \tilde{\epsilon}(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{l})} \quad (\text{A.34})$$

$$g_2 = -\frac{r\tilde{\epsilon}(\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{l})}{1 + \tilde{\epsilon}(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{l})} \quad (\text{A.35})$$

$$h_0 = \frac{\tilde{\epsilon}}{1 + \tilde{\epsilon}(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{l})} [r(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{l}) - 2g_1(\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{l})] \quad (\text{A.36})$$

$$h_1 = \frac{\tilde{\epsilon}}{1 + \tilde{\epsilon}(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{l})} [g_1(\mathbf{e}_\theta \cdot \mathbf{l}) + g_2(\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{l})] \quad (\text{A.37})$$

$$h_2 = \frac{\tilde{\epsilon}}{1 + \tilde{\epsilon}(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{l})} [r(\mathbf{e}_r \cdot \mathbf{l}) - 2g_2(\mathbf{e}_\phi \cdot \mathbf{l})] \quad (\text{A.38})$$